



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

หัวฟ่นไฟอุตสาหกรรมสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น
An Industrial Pulverized Biomass Fuel Combustor

นายจรรูวัตร เจริญสุข

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

หัวฟ่นไฟอุตสาหกรรมสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น
An Industrial Pulverized Biomass Fuel Combustor

นายจรรูวัตร เจริญสุข

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) : หัวพันไฟอุตสาหกรรมสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น

แหล่งเงิน : งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2558 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 1,713,000.00 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 2 ปี (1 ต.ค. 56 - 30 ก.ย. 58) ปีนี้เป็นปีที่.....2....

ตั้งแต่วันที่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2557 ถึงวันที่ 30 เดือน กันยายน พ.ศ. 2558

หัวหน้าโครงการวิจัย นายจารุวัตร เจริญสุข

หน่วยงานต้นสังกัด ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการสร้างเตาเผา และหัวพันไฟชนิดที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลผงระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาสมรรถนะของหัวพันไฟในด้าน ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ ความสามารถในการเพิ่มและลดอัตราการเผาไหม้ และมลพิษที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังมีจุดมุ่งหมายเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เมื่อนำมาประยุกต์สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแบบผง โดยทำการตรวจสอบกับผลการทดลองจริง จากผลการออกแบบพบว่าหัวพันไฟชนิดห้องเผาไหม้ช่วยที่มีมุมผนังบริเวณทางออกเท่ากับ 90 องศา สามารถคงความมีเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ จึงนำไปสู่การผลิตต้นแบบหัวพันไฟ และระบบสนับสนุนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง เมื่อทำการศึกษาเชิงทดลองถึงอิทธิพลของเงื่อนไขการดำเนินการที่มีผลต่อการทำงานของหัวเผา พบว่าขนาดของเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 mm. จะให้ลักษณะการเผาไหม้ที่มีแนวโน้มไปในทางที่ดี สังเกตเห็นเส้นทางเดินของปฏิกิริยาการเผาไหม้ชาร์ที่สั้น โดยมุมมองสวอร์ล (swirl blades) ที่ 100 องศา จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสมุขควงที่ดีภายในห้องเผาไหม้ช่วย ส่งผลให้หัวพันไฟสามารถคงความเสถียรภาพของการเผาไหม้ และทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องได้ และเมื่อทำการทดลองเพื่อหาช่วงการทำงานที่หัวพันไฟ พบว่าต้นแบบหัวพันไฟเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย มีช่วงการทำงานที่มีเสถียรภาพอยู่ที่ 300 kW ถึง 500 kW ซึ่งช่วงการเผาไหม้ดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมขนาดย่อมได้ โดยสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำได้สูงสุดประมาณ 0.5 ตันต่อชั่วโมงที่ความดัน 10 บาร์ จากนั้นจึงได้ทำการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของตัวเลขการไหลหมุนควงต่อพฤติกรรมของการเผาไหม้ จากผลการจำลองนั้นแสดงให้เห็นว่าตัวเลขการไหลหมุนควงมีบทบาทสำคัญในการเผาไหม้ โดยช่วยให้การผสมคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ และเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลหมุนวน เมื่อพิจารณาถึงการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ประกอบกัน พบว่าตัวเลขการไหลหมุนควงที่ 1.1 จะเหมาะสมกับการทำงานของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงนี้ โดยในอนาคตจะได้ทำการปรับปรุงเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้คาดการณ์ไว้ต่อไป

คำสำคัญ : หัวพันไฟ; การเผาไหม้; เชื้อเพลิงชีวมวล

Researcher:.....Assoc. Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk.....

Faculty:.....Engineering.....**Department:**.....Mechanical Engineering.....

ABSTRACT

This research activity involves the construction of the combustion chamber and a laboratory-scale pulverized biomass burner. Experiments were carried out aiming to assess the performance of a burner in terms of combustion efficiency, turn up/turn down range and its emissions. In addition, it included an investigation on the reliability of computational fluid dynamic program, when applied for mathematical modeling on combustion of biomass pulverized fuel, the model will be validated with the experimental results. It was found that pre-chamber burner with 90 degrees of outlet wall angle could provide stable combustion. The production of a prototype burner and supporting system for a pulverized biomass burner was then carried out. Experimental study on the influence of operating conditions on performance of the burner was performed. It was found that the particle of the fuel that passed through a grinder screen size of 0.5 mm yielded satisfactory result as far as combustion stability was concerned. This was carried out with an angle of the swirl blades at 100 degrees, where the secondary air flow was able to induce the recirculation within the pre-chamber thus enabling the combustion stability and complete char burnout within the furnace. It was found that the prototype of pulverized biomass burner with pre-chamber could maintain combustion stability at 300kW to 500kW. This could be used for small food processing industry by producing steam up to 0.5 tons per hour at 10 bar gauge approximately. The numerical simulation of pulverized biomass combustion has been demonstrated to examine the effect of swirl number on combustion characteristics. From the results, swirl number had important role in the combustion by improving the mixing of fuel and air stream and inducing the reverse flow. Therefore, the result of this study is a useful guideline for swirl burner design and operating condition of the furnace. When considering carbon monoxide and NO_x emissions, swirl number 1.1 is recommended for further improvement of combustion performance.

Keywords: Burner; Combustion; Biomass fuels

กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคล และองค์กรหลายส่วน ซึ่งผู้มีพระคุณท่านแรกที่จะใคร่กราบขอบพระคุณคือ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 ด้วยการให้ความไว้วางใจและสนับสนุนทุนอย่างดียิ่ง ทำให้การวิจัยครั้งนี้ประสบความสำเร็จ ผู้มีพระคุณท่านที่สอง คือ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้พื้นที่ในการทำวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งอุปกรณ์ต่างๆในการทำวิจัย ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ นอกจากนี้ผู้ทำวิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ คำติชมในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ และขอขอบคุณนักศึกษาผู้ร่วมทำการวิจัยในครั้งนี้ ในการให้ความร่วมมือในการทำงานวิจัยนี้อย่างดีตลอดมา

รศ.ดร.จรรวัตร เจริญสุข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
 บทที่ 1 บทนำ	 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	4
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
 บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	 6
 บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	 12
3.1 ทฤษฎีพลศาสตร์ของไหล	12
3.2 ทฤษฎีการไหลแบบปั่นป่วน	12
3.3 การเผาไหม้และการก่อมลพิษจากการเผาไหม้	19
 บทที่ 4 การคำนวณ และการออกแบบชุดทดสอบ	 21
4.1 สมการการเผาไหม้	21
4.2 การออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง	23
4.3 การออกแบบระบบป้อนเชื้อเพลิง	40
4.4 การออกแบบห้องเผาไหม้	49
4.5 การออกแบบระบบบำบัดไอเสีย	53
 บทที่ 5 อุปกรณ์ เจริญไข และวิธีการทดลอง	 57
5.1 การขึ้นรูปชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง	57
5.2 อุปกรณ์วัด ควบคุม และบันทึกผล	65
5.3 เจริญไข และวิธีการทดลอง	72

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 6 ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง	80
6.1 ผลการทดสอบระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง	80
6.2 ผลการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล	87
บทที่ 7 การจำลองเชิงตัวเลขการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผง	108
7.1 ระเบียบวิธีการคำนวณ	108
7.2 ขอบเขตและสภาวะเงื่อนไขการจำลองของหัวเผาชีวมวลผงที่มีการไหลหมุนควง	108
7.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	112
7.4 ผลการจำลองและการอภิปรายผล	116
บทที่ 8 สรุป และข้อเสนอแนะ	124
8.1 บทสรุป	124
8.2 ข้อเสนอแนะ	127
บทที่ 9 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย	128
เอกสารอ้างอิง	130
ภาคผนวก ก อาคารปฏิบัติการ	132
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	135
ภาคผนวก ค สรุปการใช้เงิน	145
ประวัติผู้เขียน	151

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สมการการเคลื่อนย้ายของ k และ ε	17
3.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแบบจำลอง $k-\varepsilon$	19
4.1 แสดงส่วนประกอบของเชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวลอัดแท่งจากหญ้าเนเปียร์	22
4.2 แสดงปริมาณไอเสียที่ 100 % Stoichiometry	23
4.3 ผลการคำนวณการออกแบบหัวเผาขนาด 1 MW ภายใต้สภาวะอากาศเกิน 30%.....	26
4.4 คุณสมบัติของถ่านหิน.....	28
4.5 เงื่อนไขการจำลองสำหรับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล	28
4.6 Kinetic Parameters สำหรับแบบจำลองการเผาไหม้ถ่านหิน.....	28
4.7 ค่าตัวแปรควบคุมที่ใช้คำนวณหาความหนาของผนังห้องเผาไหม้ช่วย	39
4.8 ผลการคำนวณขนาดถังพักเชื้อเพลิง (hopper)	42
4.9 ผลการคำนวณเพื่อออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุ	44
4.10 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องบด	47
4.11 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องบด ยี่ห้อ BONNY	48
4.12 ค่าตัวแปรควบคุมที่ใช้คำนวณหาความหนาของผนังห้องเผาไหม้.....	50
4.13 แสดงการคำนวณปริมาณไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้	56
5.1 ค่าความละเอียด และความแม่นยำของเครื่องมือวัด	71
5.2 เงื่อนไขในการทดลอง (ตัวแปรควบคุม) เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิง	76
5.3 เงื่อนไขการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล	77
6.1 การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาפקเตอร์ความเต็มรางของสกรูขนถ่าย.....	83
6.2 เปรียบเทียบกำลังการผลิตจริงกับข้อมูลจากผู้ผลิต	85
6.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงที่ผ่านการบด	86
7.1 สภาวะการทำงานของเตา.....	110
7.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง	111
7.3 การกระจายขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงผง.....	111
9.1 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ	128

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างหัวพ่นถ่านหินผงที่ออกแบบและผลิตจากต่างประเทศ และตัวอย่างหัวเผาชนิดมีการหมุนวนไอเสียที่มีการจัดสิทธิบัตรในต่างประเทศ	2
1.2 Balance of Plant for Combustor for Industrial Boiler.....	2
1.3 ผลการจำลองลักษณะของเปลวไฟในห้องเผาไหม้.....	3
1.4 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่จำลองด้วยเทคโนโลยี Computational Fluids Dynamics.....	3
2.1 ความรุนแรงของอากาศหมุนควงต่อไนโตรเจนออกไซด์ (NO _x) และคาร์บอน (C _{FA}) ในไอเสีย	7
2.2 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ (K) ที่มุมไบปิดต่างกัน.....	8
2.3 เส้นทางการไหลของแก๊สร้อน	8
2.4 ตำแหน่งของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดต่างกัน	9
2.5 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลกับถ่านหิน	10
2.6 ลักษณะของชุดทดสอบการเผาไหม้ของ M. M. Kamal.....	10
2.7 ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลของ Akio Nishiyama	11
3.1 กระบวนการเปลี่ยนผ่านของลำการไหลไปสู่ความปั่นป่วน	12
4.1 ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล (1) ระบบบด และป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล, (2) หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล, (3) ห้องเผาไหม้, (4) ระบบบำบัดไอเสีย wet scrubber, (5) ระบบป้อนอากาศ, (6) พัดลมดูดอากาศ และปล่องควัน, (7) บ่อตกตะกอน และระบบหมุนเวียนน้ำ.....	21
4.2 ขั้นตอนในการคำนวณเพื่อออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล	25
4.3 ตัวอย่างหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย	26
4.4 ลักษณะของหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (unit in mm.) (a) หัวเผาที่มีมุมผนังทางออก 135 องศา และ (b) หัวเผาที่มีมุมผนังทางออก 90 องศา.....	27
4.5 ลักษณะของกริดที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล	29
4.6 การวิเคราะห์จำนวนกริดที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนว Axial ของเตาเผา.....	29
4.7 เส้นทางการเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคคาร์ (มุมผนัง 135°); (a) อนุภาคขนาดเล็ก 10 - 30, (b) กลาง 40 - 70 และ (c) ใหญ่ 80 - 100 ไมครอน.....	30
4.8 เส้นทางการเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคคาร์ (มุมผนัง 90°); (a) อนุภาคขนาดเล็ก 10 - 30, (b) กลาง 40 - 70 และ (c) ใหญ่ 80 - 100 ไมครอน.....	30
4.9 การเปรียบเทียบถึงการกระจายตัวของความเข้มข้นของความปั่นป่วน.....	31
4.10 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผา	31
4.11 ลักษณะการกระจายตัวของความเข้มข้นของออกซิเจนตามแนวแกนของเตาเผา	32
4.12 ลักษณะการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหยตามแนวแกนของเตาเผา	32
4.13 การกระจายตัวของอุณหภูมิ [K] (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.14 การกระจายตัวของความเข้มข้นออกซิเจน (Mass Fraction) (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW.....	33
4.15 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหย (Mass Fraction) (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW.....	34
4.16 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของชาร์ (Particle Char Fraction) (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW.....	34
4.17 แสดงภาพตัดของหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber)	36
4.18 ส่วนประกอบของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย	36
4.19 ลักษณะขอบเขตของผนังห้องเผาไหม้ช่วย	37
4.20 การคำนวณหาความหนาผนังปูนของห้องเผาไหม้ช่วย	38
4.21 ผลการคำนวณหาความหนาผนังปูนทนไฟของห้องเผาไหม้ช่วย	39
4.22 มุมกองของวัสดุ	41
4.23 ลักษณะของถังพักเชื้อเพลิง (hopper); (a) ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณขนาด และ(b) ลักษณะการกองของเชื้อเพลิงที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในถังพัก (hopper).....	41
4.24 ขนาดของถังพักเชื้อเพลิง (hopper)	42
4.25 ขั้นตอนการคำนวณเพื่อออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุ	43
4.26 ภาพตัด และทิศทางการไหลของเชื้อเพลิงผ่านสกรูขนถ่าย	45
4.27 ลักษณะของสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงที่ทำการออกแบบ	45
4.28 (a) การประกอบถังพักเชื้อเพลิงกับชุดสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิง (b) ลักษณะชุดป้องกันเชื้อเพลิงชีวมวล ที่ติดตั้งเข้ากับโครงสร้าง	46
4.29 แสดงตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องบด และชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องบด.....	47
4.30 แสดงเครื่องบด ยี่ห้อ BONNY รุ่น YPT-302 (F/S).....	48
4.31 แสดงลักษณะภายในเครื่องบด ยี่ห้อ BONNY รุ่น YPT-302 (F/S).....	48
4.32 ระยะเวลาสิ้นสุดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (a) การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหย และ (b) เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคชาร์ระหว่างการเผาไหม้	49
4.33 ลักษณะขอบเขตของผนังห้องเผาไหม้.....	50
4.34 ผลการคำนวณหาความหนาผนังปูนทนไฟของห้องเผาไหม้.....	51
4.35 ลักษณะของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	51
4.36 ภาพตัดแสดงลักษณะภายในของเปลือกห้องเผาไหม้	52
4.37 ส่วนประกอบของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล	52
4.38 ลักษณะระบบบำบัดไอเสีย	53
4.39 ทิศทางการไหลของแก๊สร้อนภายในห้องบำบัดไอเสีย.....	53
4.40 ลักษณะการจัดวางตำแหน่งของระบบบำบัดไอเสีย.....	54
4.41 ขั้นตอนในการคำนวณหาปริมาตรของแก๊สไอเสีย	55
5.1 แสดงชิ้นส่วนหลักของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.2 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (ด้านหน้า).....	58
5.3 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (ด้านหลัง).....	58
5.4 แผนภาพองค์ประกอบย่อยของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	59
5.5 ลักษณะถังพักเชื้อเพลิงชีวมวลผง (hopper) และสกรูลำเลียงที่ติดตั้งเข้ากับโครงสร้าง.....	59
5.6 ระบบลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	60
5.7 แสดงอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนด้วยลมที่เลือกใช้.....	60
5.8 เครื่องอัดอากาศสำหรับอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือน.....	61
5.9 โบลเวอร์ และวาล์วปรับอัตราการไหลอากาศส่วนที่หนึ่ง (primary air).....	61
5.10 อุปกรณ์สำหรับลำเลียงเชื้อเพลิง และอากาศเข้าสู่หัวเผา.....	62
5.11 เครื่องบดเชื้อเพลิงที่ถูกติดตั้งกับระบบป้อนเชื้อเพลิง.....	62
5.12 ลักษณะของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	63
5.13 โครงสร้างห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	63
5.14 สกรูระบายเถ้าหนัก และถังพักเถ้าหนัก.....	63
5.15 มอเตอร์สกรูระบายเถ้าหนัก.....	64
5.16 ถังบำบัดไอเสีย (evaporative scrubber).....	64
5.17 ลักษณะของม่านน้ำสำหรับดักเถ้าลอย.....	65
5.18 บ่อตกตะกอน และพัดลมดูดไอเสีย.....	65
5.19 ระบบป้อนอากาศสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	65
5.20 วาล์วปีกผีเสื้อ (butterfly valve) หลังการติดตั้ง.....	66
5.21 ลักษณะการติดตั้ง Orifice plate และ Pressure Transmitter.....	66
5.22 แผนภาพการทำงานของทางเดินท่อแก๊สก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	67
5.23 แผงควบคุมแก๊ส LPG ก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	67
5.24 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิ.....	68
5.25 thermocouple type K และหน่วยแสดงผล YOKOGAWA XL 100.....	68
5.26 เครื่องวัดแก๊สไอเสีย Testo รุ่น 350 XL.....	69
5.27 อุปกรณ์ช่วยในการวัดค่าแก๊สไอเสีย (a) หลอดพัก และลดอุณหภูมิไอเสีย และ (b) ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump).....	69
5.28 อินเวอร์เตอร์ (inverter) ยี่ห้อ Schneider รุ่น ATV312.....	70
5.29 อินเวอร์เตอร์ (inverter) ยี่ห้อ Winner รุ่น WIN-V63.....	70
5.30 เครื่องวัดความเร็วรอบ (tachometer) ยี่ห้อ Digicon รุ่น DT-245P.....	70
5.31 ชุดทดสอบ sieve analysis.....	71
5.32 อุปกรณ์ขยายแรงดันไฟฟ้าสำหรับจุดประกายไฟ.....	75
5.33 ลักษณะการอ้างอิงมุมของใบพัด.....	77
5.34 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย.....	78
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของสกรูขนถ่าย (RPM) - ความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz).....	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิง (kg/min) - ความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz).....	81
6.3 เปรียบเทียบอัตราการขนถ่ายจากการทดลอง กับอัตราการขนถ่ายตามทฤษฎี ($k=0.3$).....	83
6.4 การเปรียบเทียบอัตราการผลิตของเครื่องบดต่อขนาดรูของตะแกรงเครื่องบด	84
6.5 ลักษณะเชื้อเพลิงชีวมวล (a) ลักษณะเชื้อเพลิงก่อนกระบวนการบด และ (b) ลักษณะเชื้อเพลิง หลังผ่านกระบวนการบด	85
6.6 เปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีขนาดของอนุภาคต่างกัน (a) อนุภาคขนาด 1.5 mm., (b) อนุภาคขนาด 1.0 mm. และ (c) อนุภาคขนาด 0.5 mm.	88
6.7 พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ห้องเผาไหม้ของใบพัดต่างกัน (a) ใบพัด 100 องศา, (b) ใบ พัด 85 องศา และ (c) ใบพัด 60 องศา	90
6.8 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหย (Mass Fraction) ภายในหัวเผา.....	91
6.9 เวกเตอร์ความเร็วของแก๊สภายในหัวเผา pre-chamber.....	92
6.10 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิ	93
6.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยตามระยะแนวแกน	95
6.12 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยตามระยะแนวรัศมี	98
6.13 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน	99
6.14 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน (ภายในหัวเผา).....	100
6.15 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน (ภายในห้องเผาไหม้)	100
6.16 แสดงเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน (O_2) หลังการเผาไหม้.....	101
6.17 แสดงปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หลังการเผาไหม้	102
6.18 แสดงปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) หลังการเผาไหม้.....	103
6.19 ทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคาระหว่างการเผาไหม้.....	104
6.20 เปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่ไม่ได้รับการเผาไหม้โดยแยกตามขนาดอนุภาค	105
7.1 ภาพในมุมมองโดเมตริกและขนาด (mm) ของเตาเผาไหม้ชีวมวลผง	108
7.2 แผนภาพแสดงลักษณะและส่วนต่าง ๆ ของเตาเผาไหม้ชีวมวลผง.....	109
7.3 ขอบเขตของการคำนวณและกริดของเตาเผาไหม้ชีวมวลผงที่ใช้ในการคำนวณ	109
7.4 แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตา ที่ตามแนวรัศมี (T1, T2, T3, T4 และ T5) และตามแนวแกน ($r=0$).....	110
7.5 ความเร็วตามแนวแกนกลางของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ที่แต่ละขนาดกริด	111
7.6 อุณหภูมิตามแนวแกนกลางของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ที่แต่ละขนาดกริด	112
7.7 เปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนกลางของเตาเผาไหม้ชีวมวลผงระหว่าง CFD กับการทดลอง... ..	112
7.8 เปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวเส้นรัศมีของห้องเผาไหม้ช่วยระหว่าง CFD กับการทดลอง ภาพบน ที่ตำแหน่ง $x=0.082$ m และภาพล่างที่ตำแหน่ง $x=0.182$ m	113
7.9 เปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวเส้นรัศมีของห้องเผาไหม้ช่วยระหว่าง CFD กับการทดลอง ภาพบน ที่ตำแหน่ง $x=0.282$ m และภาพล่างที่ตำแหน่ง $x=0.382$ m	114

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
7.10 เปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวเส้นรัศมีของห้องเผาไหม้ช่วงระหว่าง CFD กับการทดลอง ที่ตำแหน่ง $x=0.482$ m	115
7.11 การกระจายความเร็วตามแนวแกน (m/s) ภายในเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฟงที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง.....	116
7.12 การกระจายความดัน (Pa) ภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง.....	117
7.13 การกระจายอุณหภูมิ (K) ภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง	118
7.14 สัดส่วนเชิงโมลของสารระเหยภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง	119
7.15 สัดส่วนเชิงโมลของออกซิเจนภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง	120
7.16 สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์ภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง	121
7.17 สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง.....	122
7.18 สัดส่วนเชิงโมลของไนโตรเจนออกไซด์ภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง	123
8.1 ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฟง	124
ก.1 ภายนอกอาคาร (ด้านหน้า).....	133
ก.2 ภายนอกอาคาร (ด้านหลัง).....	133
ก.3 ภายในอาคาร.....	134

บทที่ 1

บทนำ

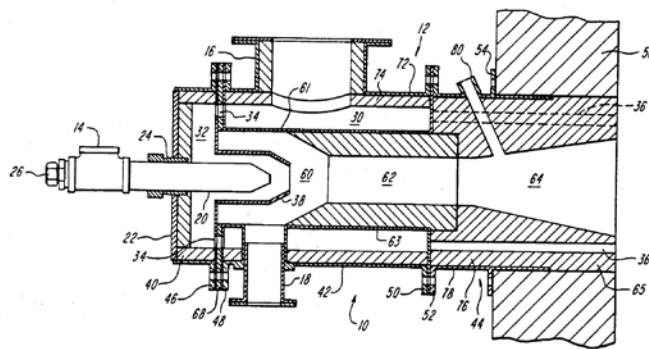
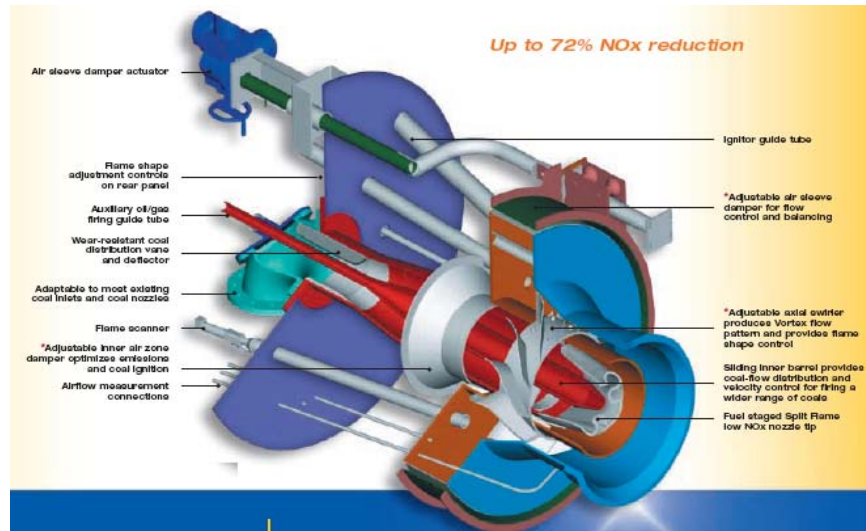
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากข้อมูลของสำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน มีการประมาณการบริโภคเชื้อเพลิงน้ำมันเตา ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหินสำหรับการผลิตไอน้ำในอุตสาหกรรมของประเทศมากถึง 2500 กิโลบาเรล เทียบเท่าน้ำมันดิบต่อวัน ซึ่งเมื่อพิจารณาเฉพาะในปีพุทธศักราช 2551 สามารถแบ่งเป็นการใช้น้ำมันเตา เป็นจำนวน 3,315 ล้านลิตร คิดเป็นมูลค่าการใช้พลังงาน 95,222 ล้านบาทต่อปี ถ่านหินในภาคอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เป็นจำนวน 13.5 ล้านตัน ในจำนวนนี้เป็นการใช้ถ่านหินในภาคการผลิตไฟฟ้า (SPP และ IPP) เป็นจำนวน 5.3 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่าการใช้พลังงาน 16,711 ล้านบาทต่อปี มีการใช้ก๊าซธรรมชาติในภาคอุตสาหกรรม เป็นจำนวนวันละ 375 ล้านลิตรต่อวัน หรือ 133,500 ล้านลูกบาศก์ฟุตต่อปี คิดเป็นเงินประมาณ 6,247 ล้านบาท รวมมูลค่าการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมคือ 118,180 ล้านบาทต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 9.5 ของมูลค่าเชื้อเพลิงนำเข้าของประเทศในปีพุทธศักราช 2551 โดยมูลค่าการนำเข้าพลังงานของประเทศเป็นจำนวน 1,239,314 ล้านบาท

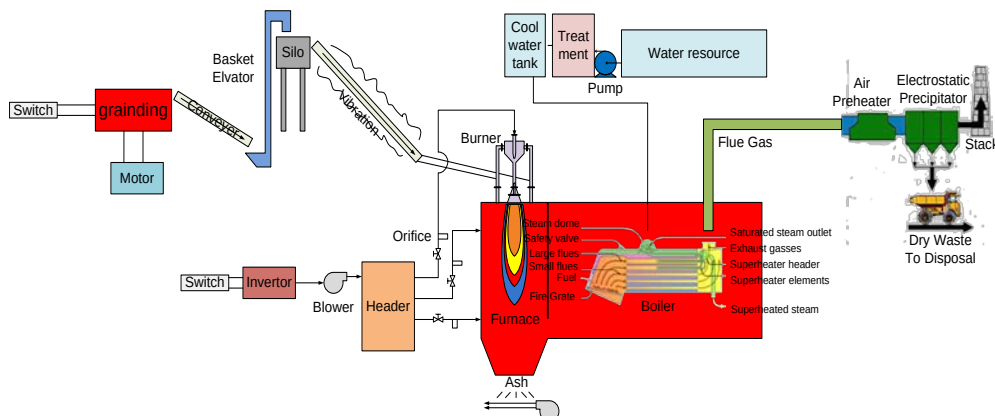
เชื้อเพลิงชีวมวลจัดเป็นแหล่งพลังงานที่หาได้ในประเทศ ที่มีความน่าสนใจแหล่งหนึ่งเนื่องจากมีปริมาณมากพอที่จะทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญต่อสถานการณ์ความมั่นคงทางด้านพลังงานของประเทศได้ มีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลกันมากขึ้นในระยะไม่กี่ปีที่ผ่านมาโดยมากเกิดในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่ทำสัญญาขายไฟฟ้าให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิต ทั้งนี้ไม่รวมถึงการใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอดีตที่ผ่านมา

การปรับเปลี่ยนมาใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำสำหรับอุตสาหกรรมภายใต้เทคโนโลยีที่จัดหาได้จากต่างประเทศนั้นโดยมากจะนำเข้ามาจากประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน หากพิจารณาในส่วนของการเผาไหม้ จะพบว่ามีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการปรับเปลี่ยนเชื้อเพลิงสูงเนื่องจากเป็นการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของเตาเผาไหม้ทั้งหมด โดยที่เทคโนโลยีการเผาไหม้ที่ผู้ประกอบการนำเข้ามาใช้นี้เป็นแบบเผาไหม้ช้า ไม่ว่าจะเป็นแบบ Fixed bed หรือ Moving Bed มีอัตราการก่อกำเริบความร้อนต่ำ จึงทำให้มีขนาดใหญ่มีการสูญเสียความร้อนในเชิง Surface heat loss สูงกว่า อีกทั้งประสิทธิภาพในการเผาไหม้น้อย และใช้อากาศส่วนเกินมาก ได้อุ่นหมุมแก๊สร้อนต่ำ โดยเฉลี่ยแล้วค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเตาเผาไหม้ชนิดที่นำเข้าจากประเทศจีน อยู่ที่ 700,000 บาท ต่อตัน ซึ่งเป็นอัตราที่ค่อนข้างสูง หากพิจารณาการผลิตไอน้ำที่ต้องการถึง 10 ตันต่อชั่วโมง ค่าใช้จ่ายในการปรับเปลี่ยนจะสูงถึง 1.5 ล้านบาทต่อตันไอน้ำ การปรับเปลี่ยนมาใช้เทคโนโลยีหัวพ่นไฟมีความน่าสนใจเนื่องจากผู้ประกอบการจะไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการสร้างเตาเผาไหม้ใหม่ อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีหัวพ่นไฟสำหรับเชื้อเพลิงแข็งไม่ใช่เทคโนโลยีใหม่ ได้มีการใช้หัวพ่นไฟสำหรับเผาไหม้ถ่านหินที่ถูกบดให้มีลักษณะเป็นผงในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น ในโรงไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตที่จังหวัดลำปาง เป็นต้น ข้อเสียของเทคโนโลยีนี้คือมีราคาสูงเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีจากกลุ่มประเทศในสหภาพยุโรปและอเมริกา การดัดแปลงหัวพ่นถ่านหินให้สามารถพ่นกลับที่บดละเอียดแล้วเข้าสู่ห้องเผาไหม้ นอกจากจะช่วยลดค่าใช้จ่ายให้กับผู้ประกอบการในประเทศในการลงทุนในการปรับเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงแล้วยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการจัดหาเชื้อเพลิงจากต่างประเทศได้อีกด้วย โดยการประมาณการหม้อไอน้ำที่สังกัดการควบคุมของกรมโรงงานอุตสาหกรรมมีประมาณ 8000 ใบ มีขีดการผลิตไอน้ำตั้งแต่ 500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จนถึง 15 ตันต่อชั่วโมง โดยเฉลี่ยกำลังผลิตอยู่ที่ 2 ตันต่อชั่วโมง ซึ่งหากคิดอัตราการบริโภคน้ำมันเตาเฉลี่ยที่ 65 กิโลกรัมต่อตันไอน้ำที่ผลิตได้ต่อชั่วโมง และมีการ

เดินหม้อไอน้ำวันละ 20 ชั่วโมง ปีละ 200 วัน จะพบว่า ต้องใช้น้ำมันเตาคิดเป็นมูลค่าที่ชีวมวลสามารถทดแทนได้เท่ากับ 3.77 ล้านบาทต่อโรงรวมทั่วประเทศคิดเป็นมูลค่าถึง 30,160 ล้านบาทต่อปี อย่างไรก็ตาม การพัฒนาหัวพ่นไฟนี้จำเป็นต้องมีการดำเนินการวิจัยและพัฒนา เพื่อไม่ให้เกิดความซ้ำซ้อนกับหัวพ่นถ่านหินผง หรือหัวพ่นเชื้อเพลิงแข็งชนิดอื่นที่ยังไม่หมดความคุ้มครองทางด้านลิขสิทธิ์ในต่างประเทศ



ภาพที่ 1.1 ตัวอย่างหัวพ่นถ่านหินผงที่ออกแบบและผลิตจากต่างประเทศ และตัวอย่างหัวเผาชนิดมีการหมุนวนไอเสียที่มีการจดสิทธิบัตรในต่างประเทศ

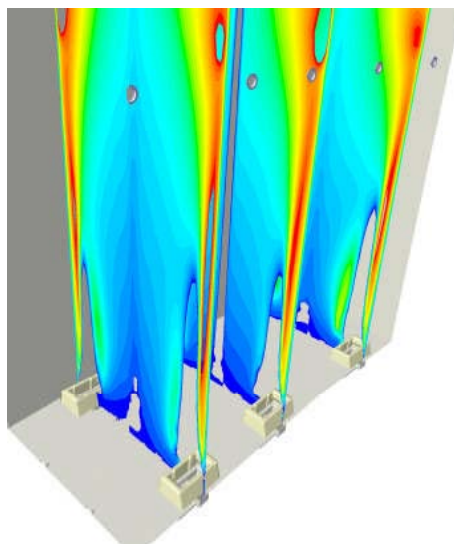


ภาพที่ 1.2 Balance of Plant for Combustor for Industrial Boiler

เทคโนโลยีทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) เป็นเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการออกแบบและการแก้ปัญหาของการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงกันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ หลักการของเทคโนโลยีนี้คือการหาคำตอบของระบบสมการคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนด้วยวิธีเชิงตัวเลข ระบบสมการดังกล่าวได้รวมแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่อธิบายพลศาสตร์ของไหลการถ่ายเทความร้อนและการเผาไหม้เข้าไว้ด้วยกัน ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดของสมการเหล่านี้ในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย



ภาพที่ 1.3 ผลการจำลองลักษณะของเปลวไฟในห้องเผาไหม้ (ที่มา : Optimization of Low-NOx Burner Installation through Simulation, Lanre Oshinowo, 2008)



ภาพที่ 1.4 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่จำลองด้วยเทคโนโลยี Computational Fluids Dynamics (ที่มา: Optimization of Low-NOx Burner Installation through Simulation, Lanre Oshinowo et. al., 2008)

ในประเทศไทยมีบริษัทเอกชน ที่ทำการพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดผงขึ้นมาเป็นระยะเวลาพอสมควร แต่ยังไม่ได้มีการใช้อย่างแพร่หลาย โดยอยู่ในขั้นของการพัฒนาให้มีมาตรฐานทัดเทียมกับผลิตภัณฑ์นำเข้าจากต่างประเทศ ในการพัฒนาคุณภาพในด้านสมรรถนะการเผาไหม้นั้น จำเป็นที่จะต้องมีความเข้าใจในกลไกการเกิดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ อันได้แก่ลักษณะของอากาศพลศาสตร์ การถ่ายเทความร้อนทั้งการพา การแผ่ และ การแผ่รังสี การเดินทางของอนุภาคเชื้อเพลิง การปลดปล่อยสารระเหย การเผาไหม้ของสารระเหย และ ถ่านชาร์ รวมถึงการกระจายตัวของก๊าซชนิดต่างๆในห้องเผาไหม้ ที่มีปฏิสัมพันธ์กันอย่างมาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นับเป็นเครื่องมือที่มีความน่าสนใจเนื่องจากจะช่วยให้ นักพัฒนาหัวพ่นไฟสามารถตรวจสอบแนวคิดในการออกแบบโดยวิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็ยังคงต้องการการพิสูจน์ว่าสามารถจำลองผลของปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์และเคมีที่เกี่ยวข้องอย่างแม่นยำเพียงพอที่จะให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์กับผู้ออกแบบได้ ทางผู้วิจัยพบว่าต้องมีการตรวจสอบผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของลักษณะการเผาไหม้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น พร้อมทั้งดำเนินการทดลองเพื่อตรวจสอบผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก่อนนำแบบจำลองนี้ไปช่วยในการออกแบบหัวเผาและห้องเผาไหม้ต่อไป โดยหากทางคณะผู้วิจัยสามารถปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ให้สามารถใช้ในการออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่นได้ ก็จะทำให้เกิดความเชื่อมั่นในแบบของหัวเผาที่พัฒนาขึ้นรวมทั้งความเข้าใจที่ลึกซึ้ง อันจะช่วยให้ออกแบบผลิตภัณฑ์ได้รับความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluids Dynamic) เมื่อนำมาประยุกต์สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแบบผง โดยทำการตรวจสอบกับผลการทดลองจริง

1.2.2 เพื่อศึกษากลไกเชิงปฏิสัมพันธ์ระหว่าง การไหล การเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนของหัวพ่นไฟที่ใช้ฝุ่นชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง โดยศึกษาสมรรถนะของหัวพ่นไฟในด้าน ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ ความสามารถในการเพิ่มและลดอัตราการเผาไหม้และมลพิษที่เกิดขึ้น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 สร้างเตาเผาและหัวพ่นไฟชนิดที่ใช้เชื้อเพลิงผงชีวมวลระดับห้องปฏิบัติการ 100 kW เพื่อทดลองและเก็บผลการกระจายอุณหภูมิและก๊าซ โดยกำหนดให้กลายเป็นเชื้อเพลิงที่ทำการศึกษา

1.3.2 ประยุกต์โปรแกรมการจำลองการเผาไหม้ให้สามารถนำมาใช้จำลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลแบบฝุ่น อันได้แก่ การเลือกแบบจำลองความปั่นป่วน การเลือกแบบจำลองการเผาไหม้ การปรับปรุงพารามิเตอร์ที่เป็นตัวบ่งชี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาปลดปล่อยสารระเหย และการเผาไหม้ของถ่านชาร์ การถ่ายเทความร้อน การแผ่รังสี การก่อตัวของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

ทำการทดลองและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สถานที่ทดลองวิจัยดำเนินการที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีรายละเอียดดังนี้

1.4.1 เก็บข้อมูลพื้นฐานด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ทำการศึกษาได้แก่ องค์ประกอบธาตุ Ultimate analysis Proximate analysis Heating value Devolatilisation and Char reactivity

1.4.2 วิเคราะห์ข้อมูลและคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงและอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

1.4.3 นำผลวิจัยที่ปรากฏรายงานการวิจัยในรูปแบบของวารสารวิชาการมาตรวจสอบเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดลักษณะทางกายภาพของหัวพ่นไฟ และเงื่อนไขในการจ่ายอากาศและเชื้อเพลิง สร้างเตาเผาทดสอบขึ้นโดยการเขียนแบบสั่งผลิต ว่าจ้างผู้รับผลิตชิ้นส่วน

1.4.4 นำเครื่องช่วยคำนวณ Computational Fluid Dynamic มาใช้ โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีมาในอดีต โดยสร้างแบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.4.5 ทำการทดลองเก็บผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง จำลองผลการเผาไหม้ของแบบจำลองหัวพ่นไฟ เปรียบเทียบผลกับการทดลอง

1.4.6 ศึกษาปัจจัยทางด้านเงื่อนไขการทำงานที่ทำให้สมรรถนะการทำงานของหัวพ่นไฟเป็นไปตาม Design objective ผ่านกระบวนการทดลองและกระบวนการจำลองด้วยเทคนิค Computational Fluid Dynamic

1.4.7 สรุปผลการทดลองและผลการจำลองด้วยเทคนิค CFD

1.4.8 เผยแพร่ผลงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1.5.1 ต้นแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงระดับห้องปฏิบัติการ

1.5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาเชื้อเพลิงตามข้อ 1

1.5.3 ผู้ประกอบการที่พัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงสามารถนำผลการศึกษามาเปรียบเทียบกับแบบหัวเผาเชื้อเพลิงของตน ช่วยให้มีความเข้าใจที่ลึกซึ้งมากขึ้นสำหรับการพัฒนาหัวพ่นไฟให้มีสมรรถนะการทำงานที่พึงประสงค์และน่าเชื่อถือ

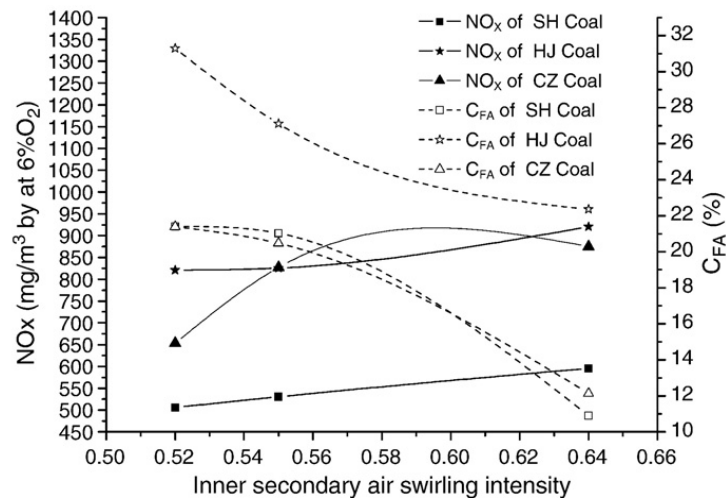
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากบทที่หนึ่งได้ทราบแล้วว่างานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่มุ่งเน้นในด้านการออกแบบ และพัฒนาหัวเผา (burner) ให้มีความเหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งบดละเอียด (pulverized wood pellet) เพื่อศึกษากลไกเชิงปฏิสัมพันธ์ระหว่าง การไหล การเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนของหัวพ่นไฟที่ใช้ฝุ่นชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง โดยศึกษาสมรรถนะของหัวพ่นไฟในด้าน ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ ความสามารถในการเพิ่มและลดอัตราการเผาไหม้และมลพิษที่เกิดขึ้น รวมไปถึงเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ(Computational Fluids Dynamic) เมื่อนำมาประยุกต์สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแบบผง โดยทำการตรวจสอบกับผลการทดลองจริง ซึ่งในการออกแบบนั้น จำเป็นต้องทำการศึกษาถึงหลักการทำงานของหัวเผา ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งต้องศึกษางานวิจัยที่มีผู้ทำมาก่อน เพื่อให้ทราบถึงแนวคิด สมบัติ และปัจจัยต่างๆที่อาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของหัวเผา นอกจากนี้ยังเป็นการป้องกันการละเมิดสิทธิบัตรของผู้วิจัยท่านอื่น ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันนี้มีนักวิจัยทั้งใน และต่างประเทศได้ศึกษาในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับเรื่องที่คุณวิจัยกำลังศึกษามากมาย อาทิเช่น

Roberto Garcia และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตร และอุตสาหกรรมแปรรูปสินค้าเกษตรกรรมในประเทศสเปน พบว่าชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) ในปริมาณน้อย ซึ่งจะส่งผลให้มีการปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในปริมาณที่น้อยเช่นกัน ในขณะที่ อุณหภูมิ สหพันธ์สมบัติ และคณะ [2] ทำการศึกษาเบื้องต้นถึงคุณภาพของชีวมวลสำหรับเชื้อเพลิงไม้อัดแท่งในประเทศไทย พบว่าทางปาล์ม ลำต้นปาล์ม และทะลายปาล์ม มีองค์ประกอบทางเคมี (ตัวอย่างเช่น potassium และ sulfur เป็นต้น) ที่ก่อให้เกิดขี้เถ้า ตะกรัน มลพิษทางอากาศ และการกัดกร่อนของชิ้นส่วนอุปกรณ์ อยู่ในปริมาณที่ต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษ ซึ่งปริมาณ potassium ที่สูงในวัตถุดิบจะส่งผลให้อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของขี้เถ้า (ash melting point) น้อยลง นอกจากนั้นค่าพลังงานความร้อนก็ยังต่ำกว่ามาตรฐานอีกด้วย ส่วนน้ำยาเคมีที่ใช้บำบัดอย่างพารามิเตอร์ประกอบของโลหะหนักจำพวก zinc lead อยู่สูง ซึ่งจะก่อให้เกิดขี้เถ้า และมลพิษทางอากาศมากขึ้น

K.D. Tiggesa และคณะ [3] ได้ศึกษาเทคโนโลยีการเผาไหม้ถ่านหินป่นในโรงไฟฟ้าถ่านหินขนาดใหญ่ โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างการเผาไหม้ภายใต้สภาวะ oxyfuel-fired และ air-fired ประกอบกับการที่หัวเผามีอุปกรณ์สร้างอากาศหมุนวน (swirl) ประกอบอยู่ด้วยจะส่งผลให้อากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้เกิดการหมุนวนทำให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่เหมาะสม ในขณะที่ Shan Xue และคณะ [4] ได้ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อ การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ และปริมาณคาร์บอนคงเหลือในเถ้าลอย ของการเผาไหม้ถ่านหินภายในเตาขนาด 1 MW พบว่าอัตราส่วนอากาศป้อนภูมิ อากาศทุติยภูมิ swirl number และองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ล้วนส่งผลต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ และคาร์บอนคงเหลือทั้งสิ้น แต่เมื่อพิจารณาภาพที่ 2.1 อิทธิพลของอากาศหมุนวนต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และคาร์บอน (C_{FA}) ที่ปนไปกับเถ้าเสีย พบว่าเมื่อความรุนแรงของอากาศหมุนวนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณคาร์บอน (C_{FA}) ที่ปนไปกับเถ้าเสียลดน้อยลง เนื่องจากความรุนแรงของอากาศที่หมุนวนที่เพิ่มขึ้น จะเหนี่ยวนำให้เกิดพฤติกรรมหมุนวนของแก๊สร้อน ความปั่นป่วน และการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศในอัตรา

ที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลดีต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ จึงทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามกลับทำให้ไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจาก thermal NO_x

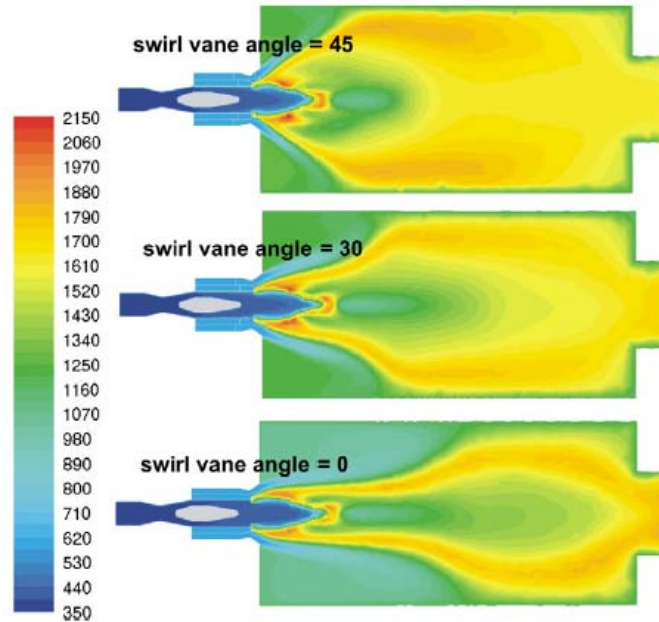


ภาพที่ 2.1 ความรุนแรงของอากาศหมุนควงต่อไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และคาร์บอน (C_{FA}) ในไอเสีย

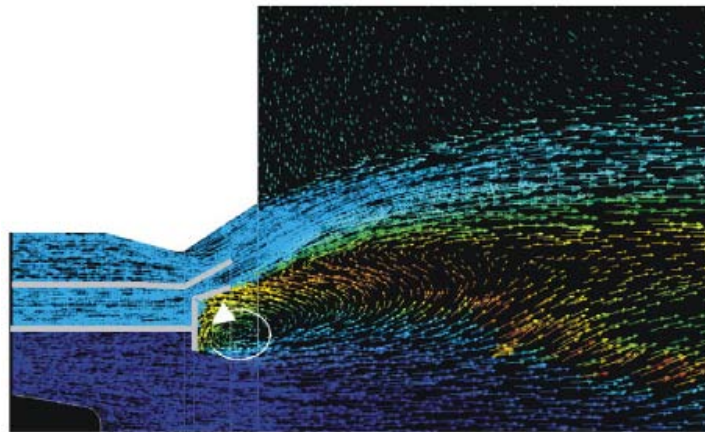
ธิติพัทธ์ ลิ้มกุล และคณะ [5] พบว่าลักษณะพฤติกรรมการไหลของอากาศที่เกิดจากการใช้หลักการหมุนควง ส่งผลดีต่อปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ และมีประสิทธิภาพเผาไหม้ที่สูงขึ้น เนื่องจากลักษณะการไหลแบบหมุนควงของอากาศและเชื้อเพลิง ทำให้มีระยะทางในการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาที่อากาศและเชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาที่มากขึ้น เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้นานขึ้น เมื่ออากาศและเชื้อเพลิงสามารถเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้นานขึ้น ย่อมส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผาสูงขึ้น และสูงพอที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ลักษณะการไหลแบบหมุนควงของอากาศและเชื้อเพลิง จะช่วยเพิ่มความรุนแรงของความปั่นป่วนของกระแสการไหล ซึ่งจะกระตุ้นให้เถ้าที่เกาะอยู่ที่ผิวด้านนอกของเชื้อเพลิงหลุดออกทำให้อากาศสามารถเข้าทำปฏิกิริยาด้านในของเชื้อเพลิงได้ ช่วยให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากขึ้น เช่นเดียวกับ Norbert Modlinski [6] ที่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบมุมมองของไบบิตต่อพฤติกรรมเผาไหม้ถ่านหินผง ซึ่งพบว่าอากาศหมุนควงจะส่งผลต่อเสถียรภาพของเปลวไฟบริเวณหัวฉีดเชื้อเพลิง เมื่อมุมของไบบิตเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การลุกติดไฟของเชื้อเพลิงเกิดเร็วขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวยังส่งผลต่อตำแหน่งของฐานเปลวไฟ โดยอิทธิพลของอากาศที่หมุนควงจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนวนของแก๊สร้อนบริเวณใกล้หัวฉีด ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ซึ่งส่งผลให้อนุภาคของเชื้อเพลิงที่ถูกพ่นออกมาจากหัวฉีดเกิดการผสมกับกระแสของแก๊สร้อน สารระเหยจะถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคเชื้อเพลิง และเกิดการติดไฟในที่สุด จึงทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง

กันตภณ อุดมโชคปิติ [7] ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อการออกแบบหัวเผาถ่านหินผงที่มีการหมุนวนแก๊สไอเสีย พบว่าลักษณะการเผาไหม้ถ่านหินแบบที่มี และไม่มี การหมุนเวียนของไอเสียมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งหัวเผาถ่านหินที่ไม่มี การหมุนเวียนไอเสียจะมีการเผาไหม้ที่รุนแรงกว่า อันเนื่องมาจากไม่มีไอเสียมาชะลอการเผาไหม้ เป็นผลให้ power output ที่ได้มีค่าสูง แต่ทว่าที่เงื่อนไขการทำงานเดียวกันค่าการปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ของกรณีที่มีการหมุนเวียนแก๊สไอเสียจะต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีการหมุนวนแก๊สไอเสีย เนื่องจากอุณหภูมิของการเผาไหม้ในกรณีที่ไม่มีการหมุนวนแก๊สไอเสียมีอุณหภูมิที่สูงกว่า บวกกับการที่การหมุนวนแก๊สไอเสียในห้องเผาไหม้นั้นเป็นการเจือจางความเข้มข้นของออกซิเจน

ซึ่งเป็นการลดโอกาสที่ไนโตรเจนจากเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน นอกจากนี้ยังให้ข้อสรุปอีกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ไนโตรเจนออกไซด์ส่วนใหญ่จะเกิดจากองค์ประกอบไนโตรเจนของเชื้อเพลิง (fuel NO_x) นั่นเอง



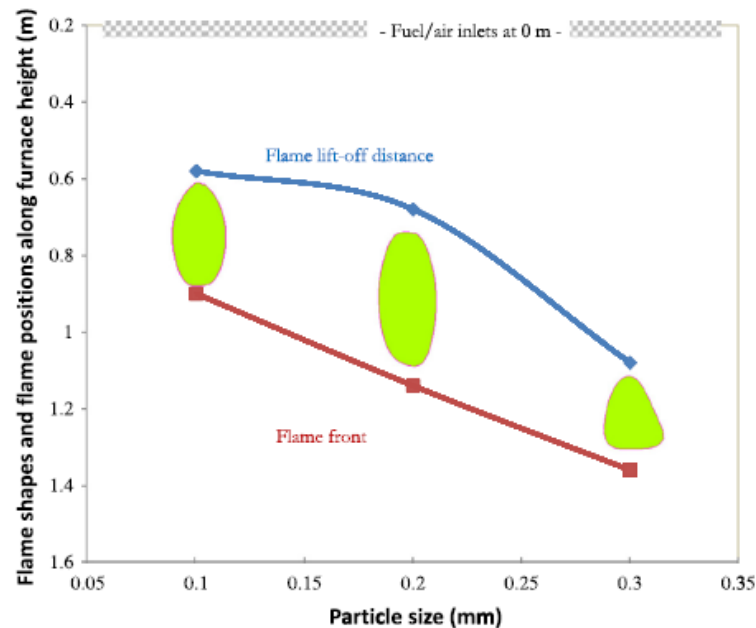
ภาพที่ 2.2 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ (K) ที่มุมใบพัดต่างกัน [6]



ภาพที่ 2.3 เส้นทางไหลของแก๊สร้อน [6]

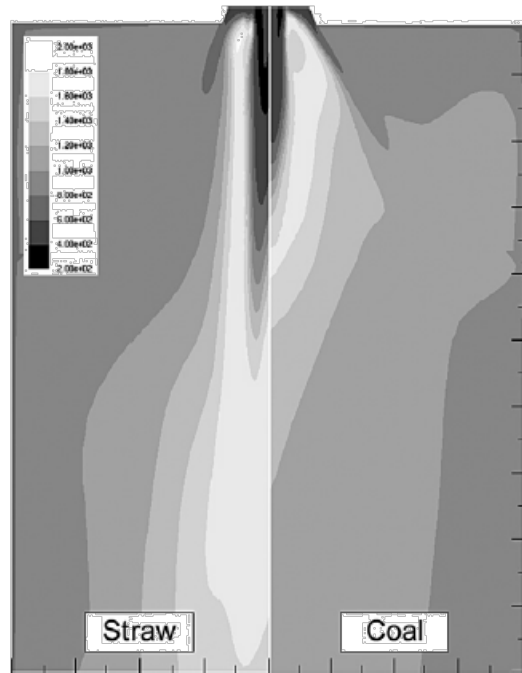
ซึ่งนอกเหนือจากอิทธิพลของอากาศหมุนควงที่ส่งผลต่อการเผาไหม้แล้ว สำหรับเชื้อเพลิงแข็ง ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงก็เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการเผาไหม้ โดย Jun Li และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงต่อพฤติกรรมของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล และสังเกตเห็นว่าเมื่ออนุภาคเชื้อเพลิงมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ฐานของเปลวไฟจะค่อยๆ เลื่อนออกไปสู่บริเวณส่วนปลายของห้องเผาไหม้ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 เนื่องจากเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ต้องการใช้ระยะเวลาในกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยที่ค่อนข้างนาน ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ช้าลง เกิดล่าช้าตามไปด้วย นอกจากนี้หากทำการทดลองที่สภาวะเดียวกัน การเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กจะ

ให้อุณหภูมิที่สูงกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงขนาดใหญ่ ซึ่งบ่งชี้ว่าอนุภาคเชื้อเพลิงขนาดเล็กจึงมีระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สั้นกว่า

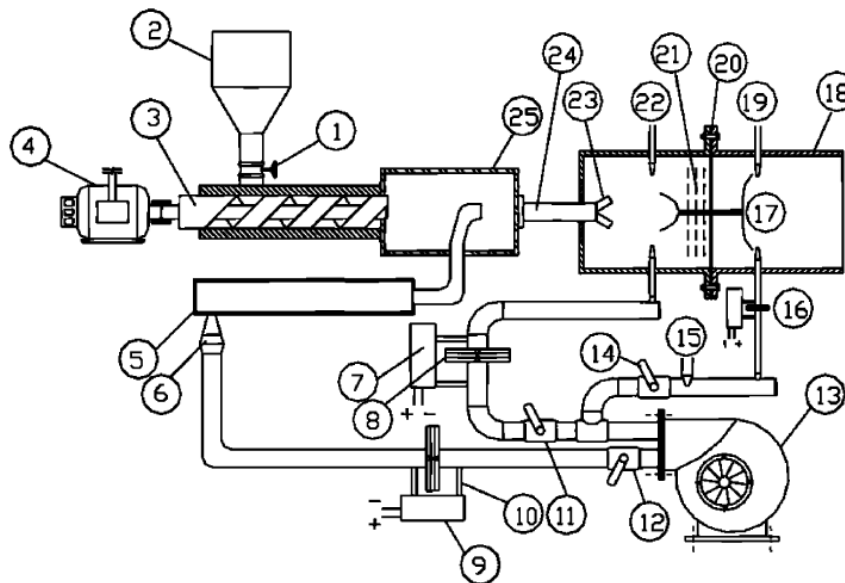


ภาพที่ 2.4 ตำแหน่งของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดต่างกัน [8]

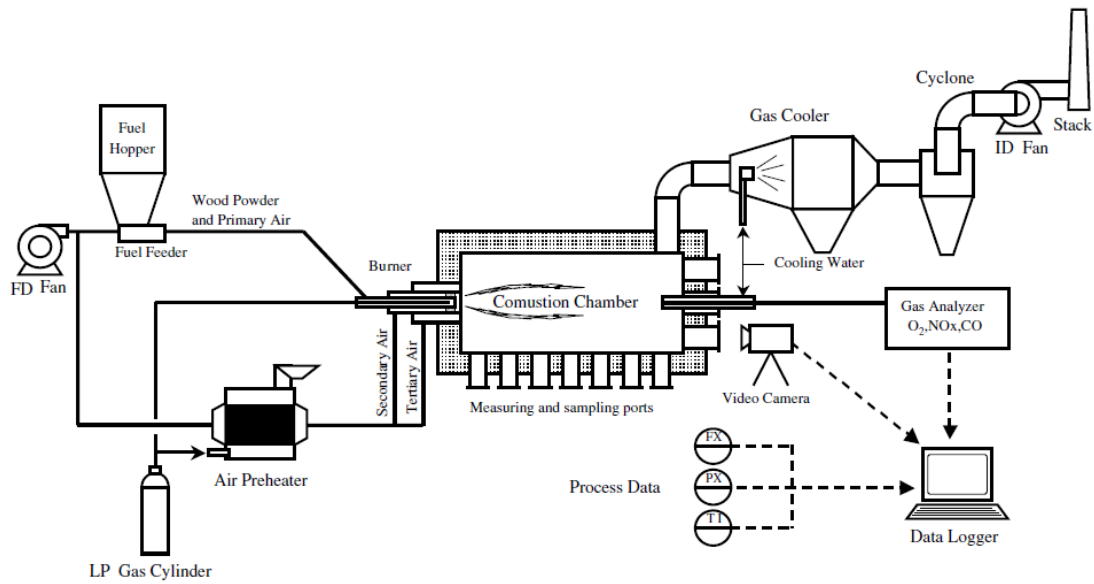
M Mando และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาการเผาไหม้ของฟางข้าวบดละเอียด (pulverized straw) โดยใช้หัวเผาถ่านหินปน ซึ่งพบว่าหัวเผาเชื้อเพลิงถ่านหินปน สามารถนำมาใช้กับฟางข้าวบดละเอียดได้ แต่เมื่อทดสอบที่สภาวะการทำงานเดียวกัน พบว่าเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวจะมีความยาวมากกว่าเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดยขนาดของอนุภาคฟางข้าวปนนั้นมีผลต่อความรุนแรงของการเผาไหม้ ซึ่งหากอนุภาคมีขนาดใหญ่ความรุนแรงของการเผาไหม้จะลดลง M. M. Kamal [10] ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้และเปลวไฟ ที่เกิดจากการผสมลว่งหน้าและไม่มีการผสมลว่งหน้าของหัวเผาถ่านหิน ได้แก่ องค์การฉีดเชื้อเพลิง ลักษณะของรูป้อนเชื้อเพลิง เป็นต้น ซึ่งได้นำเสนอชุดทดสอบ และส่วนประกอบของชุดทดสอบสมรรถนะของหัวเผาที่มีความเหมาะสมกับเชื้อเพลิงร่วมแก๊สและถ่านหิน ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ซึ่งชุดทดสอบดังกล่าวถือเป็นแนวทางสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้กับการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งชนิดอื่นๆได้ เช่นเดียวกับ Akio Nishiyama และคณะ [11] ที่ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงและมลพิษของเครื่องยนต์ Stirling ที่ขับเคลื่อนด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลไม้บดละเอียด ซึ่งได้นำเสนอถึงการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลไม้บดละเอียด และชุดทดสอบสมรรถนะของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล ดังแสดงในภาพที่ 2.7 และพบว่าห้องเผาไหม้ที่มีความยาว 3 เมตรมีความเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีขนาดน้อยกว่า 500 ไมโครเมตร



ภาพที่ 2.5 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุกรมของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลกับถ่านหิน [9]



ภาพที่ 2.6 ลักษณะของชุดทดสอบการเผาไหม้ของ M. M. Kamal [10] (1) Needle valve; (2) hopper; (3) lead screw; (4) variable speed motor; (5) air delivery tube; (6) air delivery nozzle; (7) pressure transducer; (8) orifice plate; (9) pressure transducer; (10) manometer tapings; (11) ball valve; (12) ball valve; (13) blower; (14) ball valve; (15) fuel nozzle; (16) orifice arrangement; (17) curved end; (18) combustion chamber; (19) mixture ports; (20) perforated plate; (21) porous plates; (22) nozzle; (23) burner end; (24) delivery tube; (25) coal delivery chamber.



ภาพที่ 2.7 ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงของ Akio Nishiyama [11]

จากข้อมูลโดยรวมอาจจะกล่าวได้ว่า หัวเผาเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้อยู่ในปัจจุบันยังไม่เหมาะสมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากส่วนใหญ่จะทำการประยุกต์ใช้หัวเผาเชื้อเพลิงถ่านหินมาใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวล อย่างไรก็ตาม ธนภัทร์ รักดีวรวงศ์ [12] ซึ่งเป็นหนึ่งในทีมวิจัย ได้พบว่าการใช้แบบจำลองการเผาไหม้ species transport แบบจำลองการปั่นป่วน $k-\epsilon$ Standard โดยมีการเพิ่มค่าคงที่ของอัตราการผลิตออกซิเจนภายในพื้นผิวอนุภาคคาร์ และอัตราจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของคาร์ในอัตราส่วน 2.5 เท่าของค่าเริ่มต้น และใช้แบบจำลองการติดตามแบบสุ่ม (random walk) ให้ผลการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินผง ที่มีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองอย่างน่าพอใจ และแบบจำลองดังกล่าวถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง เพื่อทำการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงสำหรับหัวเผานิคมห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ขนาด 1 MW ที่ทำการออกแบบ และกำหนดขนาด (dimension) ไว้ในเบื้องต้น พบว่าหัวเผานิคมห้องเผาไหม้ช่วยที่มีมุมผนังบริเวณทางออกเท่ากับ 90 องศา ทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคมีการฟุ้งกระจายที่มากขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย ส่งผลให้อนุภาคสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง จึงนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเผาไหม้ ซึ่งช่วยให้สามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ โดยไม่เกิดปรากฏการณ์เป่าดับ (blow off)

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1. ทฤษฎีพลศาสตร์ของไหล [13]

สมการควบคุมการไหลของของไหลแบบนิวโทเนียนอัดตัวได้

$$\text{มวล} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\text{โมเมนตัม } x \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \quad (3.2)$$

$$\text{โมเมนตัม } y \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (3.3)$$

$$\text{โมเมนตัม } z \quad \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad (3.4)$$

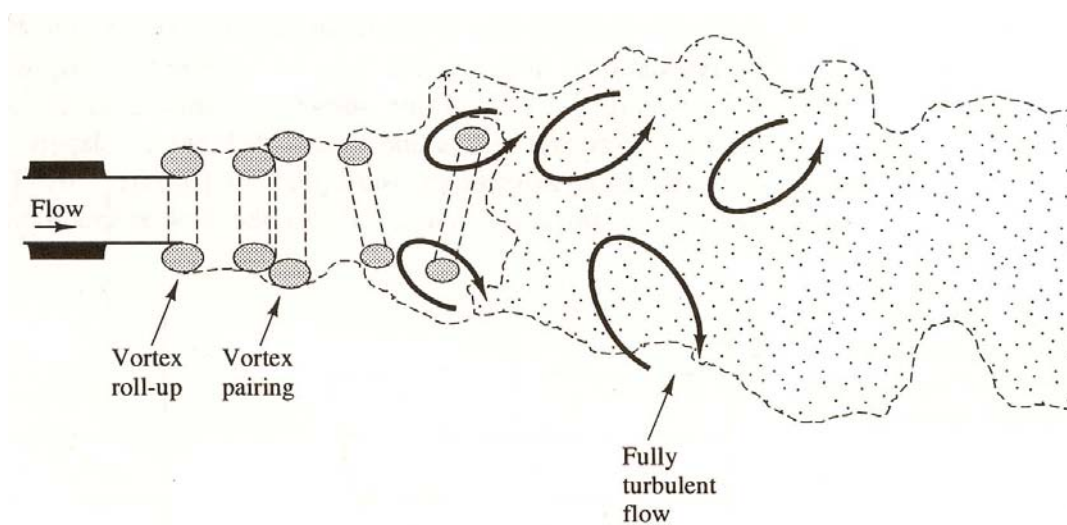
$$\text{สเกลลาร์} \quad \frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \bar{u}) = -p \text{div } \bar{u} + \text{div}(k \text{grad } T) + \Phi + S_i \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \text{สมการสถานะ} \quad p &= p(\rho, T) \text{ and } i = i(\rho, T) \\ p &= \rho RT \text{ and } i = C_v T \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.2 ทฤษฎีการไหลแบบปั่นป่วน

3.2.1 อิทธิพลของความปั่นป่วนในสมการนาเวียร์-สโตกส์

ความแตกต่างระหว่างการไหลแบบราบเรียบกับการไหลแบบปั่นป่วนก็คือ ที่การไหลปั่นป่วนนั้นจะเกิดการหมุนวนขึ้นโดยมีขนาดที่ต่างกันไป ในทางปฏิบัตินั้นเรามักจะสนใจค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติต่างๆของของไหล เช่น ค่าความเร็วเฉลี่ย ความดันเฉลี่ย ความเค้นเฉลี่ย เป็นต้น



ภาพที่ 3.1 กระบวนการเปลี่ยนผ่านของลำการไหลไปสู่ความปั่นป่วน

จากรูปเมื่อลำการไหลพุ่งออกจากท่อ มันจะสร้างวงแหวนการหมุนวนขึ้นรอบๆลำการไหล จากนั้นก็จะเกิดปรากฏการณ์การขยายขนาดการหมุนวน โดยเกิดวงแหวนเป็นคู่อยู่ชิดกันโดยมีความแรงมากขึ้น เมื่อสังเกตต่อไปจะพบว่าเกิดการเสียรูปของวงแหวนดังกล่าวและลักษณะของวงแหวนนั้นจะสังเกตเห็นได้ยากขึ้น กล่าวคือการไหลวนจะแตกออกและเกิดการหมุนวนเล็กๆขึ้นมากมายซึ่งได้วิวัฒนาการเป็นความปั่นป่วนในที่สุด

ในสมการถ่ายโอนของโมเมนตัม พจน์ที่แสดงอิทธิพลของความปั่นป่วนนี้ ถูกเขียนอยู่ในรูปการคูณกันของความเร็วผันแปร ซึ่งมีความหมายเป็นการเคลื่อนย้ายหรือถ่ายโอนโมเมนตัมอันเนื่องมาจากความเร็วผันแปรนั้น โดยทั่วไปเราจะจัดกลุ่มพจน์นี้ไว้ด้านขวาของสมการ เพื่อที่จะสะท้อนให้เห็นถึงบทบาทของพจน์นี้ว่าเป็นความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วน

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{U}\mathbf{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \text{div grad } U + \left[-\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right] \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{V}\mathbf{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \text{div grad } V + \left[-\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right] \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{W}\mathbf{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \text{div grad } W + \left[-\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right] \quad (3.9)$$

ทำการกระจายเทอมเหล่านี้ให้เห็นเพื่อให้ชัดเจน ซึ่งประกอบด้วยความเค้นตั้งฉาก 3 เทอมและเทอมของความเค้นเฉือน 3 เทอม

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= -\rho \overline{u'^2} & \tau_{yy} &= -\rho \overline{v'^2} & \tau_{zz} &= -\rho \overline{w'^2} \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= -\rho \overline{u'v'} & \tau_{xz} = \tau_{zx} &= -\rho \overline{u'w'} & \tau_{yz} = \tau_{zy} &= -\rho \overline{v'w'} \end{aligned} \quad (3.10)$$

เทอมของความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนเราเรียกว่า Reynolds stress การไหลแบบปั่นป่วนนั้น ค่าของความเค้นตั้งฉากคือ $-\rho \overline{u'^2}$, $-\rho \overline{v'^2}$ และ $-\rho \overline{w'^2}$ จะไม่เป็นศูนย์ เนื่องจากมันเป็นค่ายกกำลังสองของความผันแปร ค่าของความเค้นเฉือน $-\rho \overline{u'v'}$, $-\rho \overline{u'w'}$ และ $-\rho \overline{v'w'}$ จะเกี่ยวข้องกับสหสัมพันธ์ของค่าความผันแปรขององค์ประกอบความเร็วที่ต่างทิศทางกันนั้น เช่น ถ้าหากความผันแปร u' กับ v' ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างสิ้นเชิงแล้ว ย่อมหมายความว่าค่าของผลคูณ $u'v'$ จะเท่ากับศูนย์ โดยทั่วไปนั้นค่าความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนนี้จะมีค่าสูงกว่าความเค้นเนื่องจากความหนืดของของไหลอย่างมาก

เมื่อพิจารณาสมการการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลลาร์ ϕ ใดๆ ของของไหลภายใต้การไหลแบบปั่นป่วน เราจะสามารถแปลงสมการได้ด้วยวิธีที่คล้ายกับการแปลงสมการโมเมนตัม ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \text{div}(\Phi \mathbf{U}) = \text{div}(\Gamma_{\Phi}^* \text{grad} \Phi) + \left[-\frac{\partial \overline{u' \phi'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v' \phi'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w' \phi'}}{\partial z} \right] + S_{\Phi} \quad (3.11)$$

ในทางวิศวกรรมเรามักจะให้ความสนใจกับค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติต่างๆ ของการไหลและของไหล อย่างไรก็ตามเราจะพบว่าเกิดตัวแปรซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่เรียกว่า Reynolds Stress ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 6 เทอม ในขณะที่ในการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลาร์เฉลี่ย ก็เกิดตัวแปรขึ้นอีก 3 เทอมในแต่ละปริมาณสเกลาร์ที่เกิดขึ้น นั่นคือ $\overline{u' \phi'}$, $\overline{v' \phi'}$ และ $\overline{w' \phi'}$ และด้วยความซับซ้อนของความปั่นป่วนเราจะไม่พบสมการอย่างง่ายที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ดังนั้นเนื้อหาหลักในการสร้างแบบจำลองความปั่นป่วนจึงเกี่ยวข้องกับ การพัฒนากระบวนการวิธีในการคำนวณเพื่อให้มีความถูกต้องในระดับที่เพียงพอและมีความครอบคลุมปัญหาความปั่นป่วนโดยทั่วไปได้

3.2.2 แบบจำลองของความปั่นป่วน

แบบจำลองความปั่นป่วนนั้นเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้เติมเต็มระบบสมการที่ใช้อธิบายการไหล เพื่อให้จำนวนสมการเท่ากับจำนวนตัวแปร ในงานทางวิศวกรรมนั้นเรามักจะไม่ให้ความสนใจรายละเอียดของความปั่นป่วน แต่จะให้ความสนใจกับผลของมันต่อกระแสการไหลหลัก หมายความว่าเราต้องการสมการของค่า Reynolds Stress ที่ปรากฏในสมการ และผลของการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลาร์ที่เกิดอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนนั้น แบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นควรจะต้องใช้ได้ในลักษณะของการไหลที่หลากหลาย มีความแม่นยำ ง่ายต่อการใช้และประหยัดทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณ แบบจำลองที่พบโดยทั่วไป สามารถจัดกลุ่มได้เบื้องต้นตามที่ให้ไว้ข้างล่างนี้

3.2.2.1 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

แบบจำลองลักษณะทั่วไป อยู่บนพื้นฐานของสมการเรย์โนลด์เฉลี่ย

- Zero equation model- Mixing length model
- two-equation model k- ϵ model
- Reynolds stress equation model
- Algebraic stress model
- Non-linear k- ϵ model
- Large Eddy Simulation อยู่บนพื้นฐานของสมการที่มีการคัดกรองขนาดของการหมุนวน

แบบจำลองในลักษณะทั่วไปนั้นจะมีอยู่ในโปรแกรมเชิงพาณิชย์ ในขณะที่ Large Eddy Simulation เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ขึ้นกับเวลา โดยที่กระแสการไหลหลักและการหมุนวนจะถูกคำนวณโดยตรง ในขณะที่การหมุนวนขนาดเล็กจะถูกแทนด้วยฟังก์ชันที่กำหนดขึ้น วิธีนี้จะใช้ทรัพยากรในการคำนวณมาก ผู้ที่สนใจในรายละเอียดสามารถหาอ่านได้จาก Abbott and Basco (1989)

Mixing length model และ k- ϵ model นั้นเป็นแบบจำลองที่ได้รับการตรวจสอบอย่างมกเกี่ยวกับการไหลลักษณะต่างๆ แบบจะลองถูกพัฒนาขึ้นโดยมีสมมติฐานว่าบทบาทของ Reynolds stress ที่มีต่อการถ่ายโอนโมเมนตัมในการไหลเฉลี่ยนั้นจะคล้ายกับความเค้นอันเนื่องมาจากความหนืด ซึ่งเทอมทั้งสองนี้ล้วนปรากฏอยู่ที่ด้านขวาของสมการโมเมนตัม ในกรณีที่ของไหลเป็นแบบนิวโทเนียนจะได้ว่า

$$\tau_{ij} = \mu e_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.12)$$

เพื่อที่จะที่จะให้ง่ายในการกำหนดทิศทาง เรากำหนด 1, 2, 3 ในแต่ละค่าของ i, j ซึ่งชี้ทิศทางตามแนวแกน x, y และ z ตามลำดับดังนี้

$$\tau_{12} = \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3.13)$$

ในการทดลองนั้นจะพบว่าความปั่นป่วนมีการสลายตัวไปหากไม่มีแรงเฉือน และพบว่าค่าของ Reynolds stress จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเฉือนของการไหลเพิ่มขึ้น Boussinesq, 1877 ได้เสนอไว้ว่า ปฏิกิริยาการนี้ ดังกล่าวน่าจะมีความเชื่อมโยงกันด้วยสัมประสิทธิ์ค่าหนึ่ง ดังนี้

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.14)$$

โดย μ_t เรียกว่า eddy viscosity นอกจากนี้การเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลลาร์อื่นเนื่องจากความปั่นป่วนก็สามารถอธิบายได้ในลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือ

$$-\rho \overline{u'_i \phi'} = \Gamma_t \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) \quad (3.15)$$

โดยที่ Γ_t คือค่าของสัมประสิทธิ์การแพร่ของความปั่นป่วนนั่นเอง

และโดยที่การเคลื่อนย้ายมวล ความร้อน และโมเมนตัม ล้วนแต่เกิดขึ้นจากกลไกเดียวกันคือการหมุนวนปั่นป่วน เราจึงคาดเดาได้ว่าค่าของสัมประสิทธิ์การแพร่แบบปั่นป่วนนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าความหนืดปั่นป่วน เราทำการกำหนดค่า Prandtl/Schmidt number ซึ่งกำหนดดังนี้

$$\sigma_t = \frac{\mu_t}{\Gamma_t} \quad (3.16)$$

ซึ่งในการทดลองพื้นฐานจะพบว่ามีค่าใกล้เคียง 1

3.2.2.2 แบบจำลอง k-ε

เราสามารถสร้างสมการการเคลื่อนย้ายของคุณสมบัติทางด้านความปั่นป่วนได้ แม้กระทั่ง อัตราการสูญเสียของพลังงานจลน์ปั่นป่วน, ϵ (Bradshaw et. al., 1981) หากแต่ว่าสมการการเคลื่อนย้าย ของ ϵ นี้จะขึ้นอยู่กับตัวแปรไม่ทราบค่าจำนวนมาก และไม่สามารถวัดค่าได้ แบบจำลอง k- ϵ แบบมาตรฐาน (Laundar and Spalding, 1974) จะมีแบบจำลองการเคลื่อนย้ายของพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ k และ ϵ ซึ่งพัฒนา มาจากพื้นฐานความรู้ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการที่ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เหล่านั้นเอง เราใช้ค่า k และ ϵ คำนวณหา ค่าตัวบ่งชี้เชิงความเร็ว และตัวบ่งชี้เชิงขนาดของ Turbulent eddies ได้ ดังนี้

$$\vartheta = k^{1/2}, \ell = \frac{k^{3/2}}{\epsilon} \quad (3.17)$$

อาจมีข้อสงสัยว่าเราสามารถใช้อพารามิเตอร์ที่เป็นตัวบ่งชี้อัตราการสูญเสียของพลังงานในระดับการหมุนวนที่เล็กที่สุดนี้มาใช้ในการหาค่าตัวบ่งชี้เชิงขนาดของการไหลขนาดใหญ่ได้อย่างไร ซึ่งในการไหลที่มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่สูงนั้น อัตราการลดทอนพลังงานจากกระแสนการหมุนวนขนาดใหญ่จะเท่ากับอัตราการสูญเสียของพลังงานจลน์ปั่นป่วน เนื่องจากการถ่ายโอนพลังงานผ่านชั้นของการหมุนวนระดับรองลงมา สู่การหมุนวนในระดับเล็กสุด นั่นเอง เมื่อใช้หลักของการสร้างเทอมของ Turbulent viscosity จาก Mixing Length model มาพิจารณา เราจะได้

$$\mu_t = C_p \vartheta \ell = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.18)$$

โดยที่ ค่า C_μ เป็นค่าตัวแปรไร้มิติซึ่งเป็นค่าคงที่

สำหรับแบบจำลอง k- ϵ มาตรฐาน จะใช้สมการการถ่ายโอนต่อไปนี้สำหรับ k และ ϵ

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad} k \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \epsilon \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad} \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.20)$$

ในสมการจะมีค่าคงที่อยู่ที่ทั้งสิ้น 5 ตัว ซึ่งสามารถปรับค่าเพื่อให้ใช้ได้กับลักษณะการไหลที่หลากหลายได้ ดังนี้ $C_\mu = 0.09$; $\sigma_k = 1.00$; $\sigma_\epsilon = 1.30$ $C_{1\epsilon} = 1.44$ $C_{2\epsilon} = 1.92$

ในการหาค่า Reynolds Stress เราสามารถนำความสัมพันธ์ของ Bossinesq มาใช้ ได้ดังนี้

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} = 2\mu_t E_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3.21)$$

เมื่อทำการพิจารณาสมการนี้ จะพบว่า มีพจน์สุดท้ายที่มีค่า δ_{ij} ซึ่งเรียกว่า Kronecker delta ($\delta_{ij} = 1$ เมื่อ $i=j$ และ $\delta_{ij} = 0$ เมื่อ $i \neq j$) พจน์นี้จะทำให้ด้านขวามือของสมการแทนความหมายของ Normal Reynolds Stress นั่นคือ $\tau_{xx} = -\rho \overline{u'^2}$, $\tau_{yy} = -\rho \overline{v'^2}$, $\tau_{zz} = -\rho \overline{w'^2}$ เมื่อ $i=j$

เห็นได้ชัดว่าในการไหลไม่ว่าจะเป็นรูปแบบใด เราก็จะได้ ผลรวมของ Normal Reynolds stress $-\rho(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$ เป็นค่าติดลบสองเท่าของค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนจำเพาะ ซึ่งมีหน่วยเป็นพลังงานต่อปริมาตร ($-2\rho k$) ดังนั้นการปรับค่าให้ถูกต้องในเชิงกายภาพจึงทำการลบค่าออกหนึ่งในสามของค่าดังกล่าวออก ซึ่งจะทำให้เช่นนั้นก็ต่อเมื่อ เทอมข้างต้นเป็นเทอมของ Normal Stress การไหลที่กล่าวถึงนี้เป็นการไหล แบบ Isotropic ซึ่งเป็นสมมุติฐานที่ใช้สำหรับแบบจำลองนี้

3.2.2.3 เงื่อนไขค่าขอบ

สมการการเคลื่อนย้ายของ k และ ε เป็นสมการจำพวก elliptic เนื่องจากอิทธิพลของเทอมการแพร่ ซึ่งทำให้มีความจำเป็นที่ต้องกำหนดเงื่อนไขค่าขอบ ดังนี้

ตารางที่ 3.1 สมการการเคลื่อนย้ายของ k และ ε

ทางเข้า	ค่าของ k และ ε จะต้องมาให้
ทางออกและบริเวณแกนสมมาตร	$\partial k / \partial n = 0$ และ $\partial \varepsilon / \partial n = 0$
การไหลอิสระ	$k = 0$ และ $\varepsilon = 0$
ผนังของแข็ง	การกำหนด ขึ้นอยู่กับค่า Reynolds number.

ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปแล้วจะใช้ค่า k และ ε ของทางเข้าที่ได้จากผลงานตีพิมพ์ของนักวิจัย อาจมีการศึกษาผลกระทบของค่าเหล่านี้ต่อการไหลเพิ่มเติมเพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของผลการจำลองที่ได้ นอกจากนี้เราสามารถประมาณการค่า k และ ε อย่างคร่าวๆได้ จากความเข้มข้นของความปั่นป่วน (Turbulence Intensity) T_i และค่าบ่งชี้เชิงขนาด L ของช่องการไหล โดยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$k = \frac{3}{2} (U_{ref} T_i)^2; \quad \varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\ell}; \quad \ell = 0.07L \quad (3.22)$$

สูตรที่ให้นี้จะเกี่ยวเนื่องกับสูตรของ Mixing length ในหัวข้อ 3.5.1 นั่นเอง สำหรับ ค่า ของ k และ ε บริเวณใกล้ผนัง สามารถคำนวณได้โดยแยกเป็นสองกรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 เรย์โนลด์นัมเบอร์ สูงๆ ซึ่งกำหนด โดย $30 < y_p^+ < 500$ โดยให้แกน y มีทิศทางตั้งฉากจากผนังและตำแหน่ง y_p คือตำแหน่งที่พิจารณา และ y_p^+ คือ Dimensionless distance ที่บริเวณนี้ค่าความเร็วกระจายตัวแบบลอกกาลีทิมกับระยะทาง y อัตราการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนจะเท่ากับอัตราการสูญเสีย จะได้ว่า

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(E y_p^+); \quad k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}}; \quad \varepsilon = \frac{u_\tau^3}{\kappa y} \quad (2.23)$$

โดยที่ค่าคงที่ของ Von Karman เท่ากับ 0.41 และ Wall roughness factor, E สำหรับผนังเรียบ เท่ากับ 9.8 ในกรณีของผนังขรุขระ เราสามารถหาค่าดังกล่าวได้จาก Schlichting, 1979 สำหรับการถ่ายเทความร้อนจะได้

$$T^+ \equiv -\frac{(T - T_w)C_p \rho u_\tau}{q_w} = \sigma_{T,t} \left[u^+ + P \left(\frac{\sigma_{T,l}}{\sigma_{T,t}} \right) \right] \quad (3.24)$$

เมื่อ

T_p คือ อุณหภูมิ ณ ตำแหน่ง y_p

T_w คือ อุณหภูมิที่ผนัง

q_w คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผนัง

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหล

$\sigma_{T,t}$ คือ ค่า Turbulent Prandtl Number

$\sigma_{T,l} = \frac{\mu C_p}{\Gamma_T}$ Laminar Prandtl number

Γ_T คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity)

P เป็นฟังก์ชันการแก้ค่าซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนระหว่าง Laminar Prandtl number กับ Turbulent Prandtl number

กรณีที่ 2_เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำๆ สมการการถ่ายโอน k และ ε จะมี wall-damping function มาเสริม ดังนี้ (Patel et. al., 1985)

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad } k \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} f_1 \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.27)$$

จะเห็นว่า สัมประสิทธิ์ความหนืด ไม่สามารถตัดทิ้งได้ และ Wall-damping function เป็นดังนี้ (Lam and Bremhorst, 1981)

$$f_\mu = \left[1 - \exp(-0.0165 Re_y) \right]^2 \left(1 + \frac{20.5}{Re_t} \right); \quad f_1 = \left(1 + \frac{0.05}{f_\mu} \right)^3; \quad (3.28)$$

$$f_2 = 1 - \exp(-Re_t^2); \quad Re_y = k^{1/2} y / \nu; \quad Re_t = \mathcal{G} \ell / \nu = k^2 / \varepsilon \nu$$

ถึงแม้ว่าแบบจำลอง k- ϵ จะได้รับความนิยมอย่างมากในการนำไปใช้ แต่ก็มีข้อจำกัดอยู่ไม่น้อย ดังกล่าวไว้โดยสังเขปในตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแบบจำลอง k- ϵ

ข้อดี	1. เป็นแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อน ต้องการเพียงเงื่อนไขค่าขอบ และ/หรือ เงื่อนไขเริ่มต้น เท่านั้น 2. ให้ผลการจำลองดีในการไหลหลายๆลักษณะที่พบเห็นในอุตสาหกรรม 3. เป็นแบบจำลองที่ได้รับการตรวจสอบกับการไหลที่หลากหลายที่สุด
ข้อเสีย	ใช้ทรัพยากรมากกว่า แบบจำลอง Mixing Length model ให้ผลการจำลองที่ไม่ดีในลักษณะการไหลดังต่อไปนี้ การไหลที่ไม่มีขอบเขตแน่นอนบางแบบ การไหลที่มีความเครียดสูงมากๆ (ชั้นขีตผิวที่มีความโค้งมากๆ การไหลเป็นเกลียว) การไหลแบบหมุนวน การไหลที่มีการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ในท่อที่มีหน้าตัดไม่เป็นวงกลม

3.3 การเผาไหม้และการก่อมลพิษจากการเผาไหม้

3.3.1 การเผาไหม้แบบ Non-Premixed

ในการเผาไหม้แบบ non-premixed นั้น เชื้อเพลิงและออกซิโดซ์เซอร์ถูกป้อนจากท่อทางเข้าหรือแหล่งที่แยกจากกัน ก่อนแพร่เข้าสู่บริเวณทำปฏิกิริยา โดยในส่วนนี้จะแตกต่างกับ การเผาไหม้แบบ premixed ซึ่งตัวทำปฏิกิริยาได้ผสมกันในระดับโมเลกุลก่อนที่จะเผาไหม้ ตัวอย่างสำหรับการเผาไหม้แบบ non-premixed รวมถึงห้องเผาไหม้ถ่านหินผง การเผาไหม้ของห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลและในอ่างไฟ ภายใต้สมมุติฐานที่ใช้สำหรับลักษณะการผสมกันของก๊าซแบบปั่นป่วน สัดส่วนย่อยของก๊าซผสมสามารถคำนวณได้จากพารามิเตอร์เดียว นั่นคือ Mixture fraction ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ f พารามิเตอร์นี้ถูกนิยามว่าเป็นสัดส่วนเชิงมวลของเชื้อเพลิง ที่มีอยู่ในสปีชีส์ต่างๆที่ผสมกันอยู่ในห้องเผาไหม้ หรือกล่าวโดยอีกนัยหนึ่งได้ว่า f คือสัดส่วนเชิงมวลของธาตุในเชื้อเพลิงที่ไหม้และไม่ไหม้ (คาร์บอน, ไฮโดรเจน ฯลฯ) ในสปีชีส์ทั้งหมด (CO_2 , H_2O , O_2 ฯลฯ) เพราะว่าอะตอมของธาตุได้ถูกอนุรักษ์ไว้ในปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นสมการควบคุมการถ่ายเทจะไม่มีพจน์ของแหล่งกำเนิด นอกจากนี้ ปัญหาการเผาไหม้ได้ถูกมองให้เป็นการทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว (fast kinetic) เมื่อเทียบกับอัตราการผสมกันของกระแสมุขวนปั่นป่วน ดังนั้นความซับซ้อนเนื่องมาจากการเข้าใกล้อัตราปฏิกิริยาแบบไม่เชิงเส้นจะไม่นำมาคิด ปฏิกิริยาของสารเคมีสามารถจำลองเป็นแบบสมดุลได้ด้วยแบบจำลองสมดุลเคมี (Chemical equilibrium) เช่น แบบจำลองเปลวไฟราบเรียบคงที่ หรือแสดงได้จากสมดุลเคมีที่ใช้แบบจำลองเปลวไฟราบเรียบไม่คงที่

แบบจำลอง Non-premixed ของการเผาไหม้ถ่านหิน จะมีการจำลองการกระจายตัวของ mixture fraction ที่เป็นตัวแทนของเชื้อเพลิงสองชนิด คือ สารระเหย (Volatile) และ ถ่านชาร์ การกระจายตัวสำหรับสปีชีส์เดียวจะไม่ถูกคำนวณแยกออกจาก Mixture fraction แต่จะเป็นค่าที่สัมพันธ์กับ Mixture fraction กล่าวคือความเข้มข้นของสปีชีส์จะได้อาจมาจากการแปลงค่าของ Mixture fraction โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง Mixture fraction และ สปีชีส์ต่างๆที่แน่นอน ปฏิสัมพันธ์ของความปั่นป่วนและปฏิกิริยาเคมีจะถูกนำมาพิจารณา โดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (PDF)

3.3.2 การก่อเกิดและการลด NOx

ในเปลวไฟลามินาร์และที่ระดับโมเลกุลภายในเปลวไฟที่ปั่นป่วน การก่อเกิดของ NOx สามารถแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนทางเคมีที่ชัดเจน ได้แก่ การก่อเกิด thermal NOx การก่อเกิด prompt NOx การก่อเกิด fuel NOx และ N₂O ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา แรกเริ่ม Thermal NOx ก่อตัวโดยการออกซิเดชันของไนโตรเจนในบรรยากาศในการเผาไหม้ Prompt NOx เกิดโดยการเกิดปฏิกิริยาที่มีความรวดเร็วที่บริเวณหน้าเปลวไฟ และ fuel NOx เกิดโดยออกซิเดชันของไนโตรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง ที่ระดับความดันที่สูงขึ้นและสภาวะที่ออกซิเจนหนา NOx อาจจะก่อเกิดจากโมเลกุลของไนโตรเจน (N₂) ผ่าน intermediate N₂O ทั้งนี้ การเผาไหม้ช้าและกระบวนการ SNCR จะช่วยลดการก่อเกิด NOx ทั้งหมดได้ โดยการคำนวณปฏิกิริยาของ NO กับไฮโดรคาร์บอนและแอมโมเนียตามลำดับ

สมการควบคุมสำหรับการถ่ายเท NOx

สมการการถ่ายเทมวลของสปีชีส์ NO มีส่วนของ การพัดพา การฟุ้งกระจาย การผลิตและการบริโภคของ NO และสปีชีส์ที่เกี่ยวข้อง รูปแบบสมการนี้เป็นรูปแบบสมการทั่วไปได้มาจากหลักการพื้นฐานของการอนุรักษ์มวล ผลกระทบของเวลาในการกระบวนการเกิด NOx ในกรอบอ้างอิง Lagrangian ได้ถูกรวมไว้ในพจน์ของการพาในสมการควบคุมที่มีอยู่ในกรอบอ้างอิง Eulerian สำหรับกระบวนการ thermal NOx และ prompt NOx นั้นจะมีเฉพาะสมการถ่ายเทของสปีชีส์ NO เท่านั้นที่นำมาใช้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho \mathcal{D} \nabla Y_{NO}) + S_{NO} \quad (3.29)$$

กระบวนการเกิด fuel NOx มีรายละเอียดอีกมาก อย่างไรก็ตาม การติดตามสปีชีส์ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยาที่มีไนโตรเจนอยู่นั้นมีความสำคัญ ดังนั้นแบบจำลองจะมีการคำนวณในส่วนการถ่ายเทของสปีชีส์ HCN, NH₃ หรือ N₂O นอกเหนือจากสปีชีส์ NO

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{HCN}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{HCN}) = \nabla \cdot (\rho \mathcal{D} \nabla Y_{HCN}) + S_{HCN} \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NH_3}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{NH_3}) = \nabla \cdot (\rho \mathcal{D} \nabla Y_{NH_3}) + S_{NH_3} \quad (3.31)$$

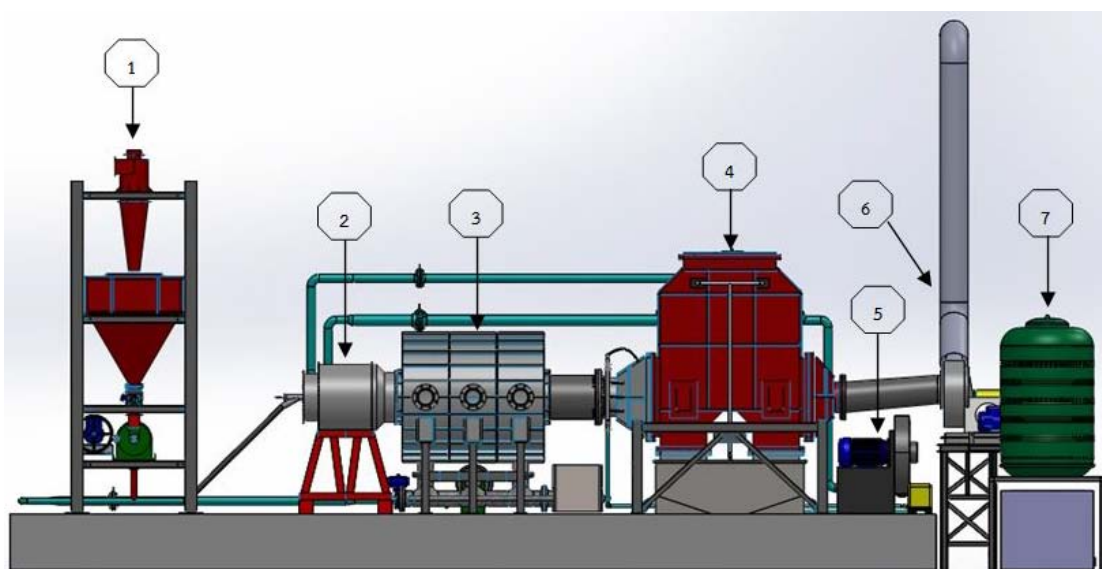
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{N_2O}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{N_2O}) = \nabla \cdot (\rho \mathcal{D} \nabla Y_{N_2O}) + S_{N_2O} \quad (3.32)$$

ซึ่ง Y_{HCN} , Y_{NH_3} , Y_{N_2O} และ Y_{NO} เป็นสัดส่วนเชิงมวลสำหรับ HCN, NH₃, N₂O และ NO ในสถานะแก๊สและ $\mathcal{D}$ เป็นสัมประสิทธิ์ของการแพร่ พจน์แหล่งกำเนิด S_{HCN} , S_{NH_3} , S_{N_2O} และ S_{NO} ถูกกำหนดสำหรับกระบวนการเกิด NOx ที่แตกต่างกัน ซึ่งที่กล่าวมาเป็นการยกตัวอย่างโดยสังเขปของกรอบทฤษฎีที่นำมาศึกษาวิจัยในงานวิจัยนี้ รายละเอียดของแบบจำลองสามารถตรวจสอบเพิ่มเติมได้ในเอกสารอ้างอิง [3] และ [14]

บทที่ 4

การคำนวณ และการออกแบบชุดทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงรายละเอียดการคำนวณโดยอ้างอิงทฤษฎีต่างๆ ได้แก่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง สมการการเผาไหม้ กลศาสตร์ของไหล หลักการขนถ่ายวัสดุ และการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น เพื่อให้ได้มาซึ่งชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ซึ่งนอกเหนือจากหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นหัวข้อหลักของงานวิจัยแล้ว ทางทีมวิจัยจะต้องออกแบบระบบป้อนเชื้อเพลิง ห้องเผาไหม้ ระบบลดอุณหภูมิ และระบบบำบัดไอเสีย เพื่อมารองรับการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งรูปแบบของชุดทดสอบดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 4.1



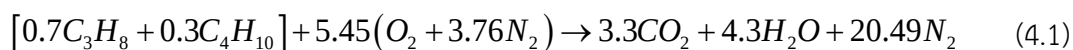
ภาพที่ 4.1 ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง (1) ระบบป้อน และป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง, (2) หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล, (3) ห้องเผาไหม้, (4) ระบบบำบัดไอเสีย wet scrubber, (5) ระบบป้อนอากาศ, (6) พัดลมดูดอากาศ และปล่องควัน, (7) บ่อตกตะกอน และระบบหมุนเวียนน้ำ

4.1 สมการการเผาไหม้

ในการออกแบบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้นั้น ผู้วิจัยควรทราบถึงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สมการการเผาไหม้ และให้ได้มาซึ่งอัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิง สำหรับงานวิจัยนี้หัวเผานิตห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ถูกออกแบบมาเพื่อให้มีความเหมาะสมกับเชื้อเพลิงชีวมวลผง แต่ทว่าตอนเริ่มต้นจุดเตานั้นจะต้องใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงในการอุ่นให้ผนังเตาร้อน จนอุณหภูมิของผนังเตาสูงกว่าอุณหภูมิจุดติดไฟของเชื้อเพลิงชีวมวลผง แล้วเชื้อเพลิงชีวมวลผงจะถูกป้อนให้เกิดการเผาไหม้ในเตาต่อไป ดังนั้นเชื้อเพลิงที่จะถูกนำมาใช้ในการทดสอบคือ แก๊ส LPG และเชื้อเพลิงชีวมวลผง ซึ่งสมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดเป็นดังนี้

4.1.1 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงแก๊ส LPG

แก๊ส LPG มีส่วนประกอบหลักคือ โพรเพน (C_3H_8) ประมาณ 70% และมีบิวเทน (C_4H_{10}) ประมาณ 30% โดยปริมาตร ซึ่งสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ได้เป็น



จากสมการทางเคมีจะได้ว่า

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้เท่ากับ $(0.70 \times 44) + (0.30 \times 58) = 48.20 \text{ kg}$

ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เท่ากับ $5.45 \times [32 + (3.76 \times 28)] = 748.18 \text{ kg}$

ดังนั้น

$$\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง } (A/F) = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right) = \frac{748.18}{48.20} = 15.52 \frac{kg_{air}}{kg_{fuel}} \quad (4.2)$$

4.1.2 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบหัวเผาคือ หญ้าเนเปียร์ (Napier grass) ซึ่งตารางที่ 4.1 แสดงถึงส่วนประกอบของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์ ซึ่งกรณีศึกษาจะทำการวิเคราะห์การเผาไหม้ที่สภาวะ stoichiometry โดยการวิเคราะห์สมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะคิดที่สภาพที่ได้รับ ดังนี้

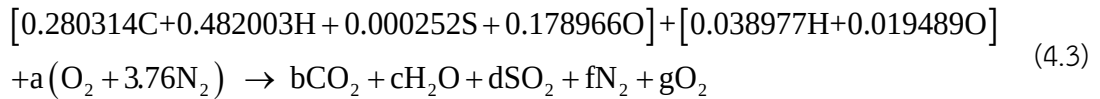
ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากหญ้าเนเปียร์

คุณสมบัติ	สภาพที่ได้รับ	หลักอ้างอิงแห่ง
การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis)		
ความชื้น,%	4.57	-
สารระเหย,%	66.91	70.11
ถ่านคงตัว,%	20.22	21.19
เถ้า,%	8.30	8.70
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)		
ไฮโดรเจน,%	6.58	6.36
คาร์บอน,%	45.92	48.12
ไนโตรเจน,%	0.00	0.00
ออกซิเจน,%	39.09	36.71
ซัลเฟอร์,%	0.11	0.11
ค่าความร้อนสูง, kcal/kg	4,120	4,320
ค่าความร้อนต่ำ, kcal/kg	3,790	3,970

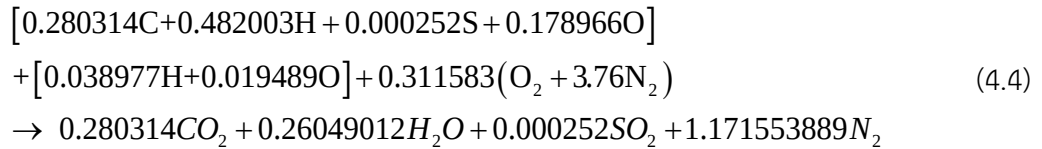
ที่มา : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

4.1.2.1 ณ สภาพที่ได้รับ (ความชื้น 4.57 %) ที่สภาวะ stoichiometry

เมื่อวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพนำส่งตามที่แสดงไว้ดังตารางที่ 4.1 จะสามารถเขียนสมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง ได้ดังนี้



ทำการสมดุลสมการจะได้สมการการเผาไหม้ที่สภาวะ stoichiometry ดังนี้



จากการวิเคราะห์สมการการเผาไหม้จะทำให้ได้อัตราส่วนอากาศ/เชื้อเพลิง (AF ratio) ที่สภาวะ Stoichiometry ประมาณ $5.572 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ ซึ่งตัวเลขนี้จะนำไปสู่การคำนวณเพื่อออกแบบหัวเผาต่อไป

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณไอเสียที่ 100 % Stoichiometry

สารประกอบ	สัดส่วนโดยโมล	สัดส่วนโดยมวล
CO ₂	0.129	0.197
H ₂ O	0.120	0.074
SO ₂	0.000116	0.000257
N ₂	0.705	0.680
O ₂	0.043	0.048
ผลรวมของเลขดุลหน้าสารประกอบ 2.158		
มวลโมเลกุลของไอเสีย = $29.041 \text{ kg}_{\text{ไอเสีย}}/\text{kmol}_{\text{ไอเสีย}}$		

4.2 การออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง

4.2.1 แนวคิดในการออกแบบ

ก่อนที่จะทำการออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลนั้น ควรที่จะทำการศึกษางานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้อง เพื่อจำกัดกรอบแนวคิดให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้น จากการสำรวจงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์ จะพบว่าหัวเผาที่มีการไหลหมุนควงของอากาศ (swirl) ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันที่เผาไหม้ที่เหมาะสม [3] ส่งผลดีต่อกระบวนการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ และมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงขึ้น [7] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยบางส่วนสนับสนุนว่าหัวเผาเชื้อเพลิงถ่านหินปน สามารถนำมาใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลทดละเอียดยได้ แต่เมื่อทดสอบที่สภาวะการทำงานเดียวกันพบว่า เปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจะมีความยาวมากกว่าเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน [9] ดังแสดงในภาพที่ 2.5 เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อน (heating value) ที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับถ่านหิน หากจะทำการเผาไหม้ที่กำลังความร้อนเดียวกัน กรณีของเชื้อเพลิงชีวมวลจึงต้องป้อนเชื้อเพลิง และอากาศในปริมาณที่มากกว่าถ่านหิน จึงส่งผลให้เปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลมีความยาวที่มากกว่า และเมื่อสังเกตบริเวณหัวเผาในกรณีของการเผาไหม้

เชื้อเพลิงชีวมวล จะพบว่าระยะฐานของเปลวไฟ (flame lift off distance) จะเลื่อนออกห่างจากหัวเผา และสังเกตเห็นบริเวณใกล้หัวเผากการกระจายตัวของอุณหภูมิจะค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกรณีถ่านหิน เนื่องจากในกรณีของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจะมีการพัดพาของมวลอากาศเย็นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในบริเวณที่ค่อนข้างสูง ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้จึงล่าช้า เชื้อเพลิงชีวมวล เป็นเชื้อเพลิงที่ต้องอาศัยระยะเวลาในกระบวนการ Heat and Dry ที่ค่อนข้างนานเมื่อเทียบกับกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization) จึงทำให้บริเวณใกล้หัวเผามีอุณหภูมิที่ต่ำ โดยลักษณะเช่นนี้จะส่งผลเสียต่อการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ

การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนที่ค่อนข้างต่ำ การรักษาเสถียรภาพฐานของเปลวไฟจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ดังนั้นทางทีมีวิจัยจึงจะทำการออกแบบหัวเผาให้มีลักษณะเป็นห้องเผาไหม้ช่วยที่ประกอบไปด้วยใบพัด (swirl pre-chamber) โดยห้องเผาไหม้ช่วยจะทำหน้าที่เป็นห้องที่ทำหน้าที่รักษาเสถียรภาพฐานของเปลวไฟ เพื่อชดเชยปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่างล่าช้า และชดเชยระยะฐานของเปลวไฟ (flame lift off distance) ที่จะเลื่อนออกห่างจากหัวเผา ในขณะที่ใบพัดจะเป็นตัวช่วยให้เกิดอากาศในลักษณะหมุนควงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย และเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนวนบริเวณ IRZ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 เพื่อให้กระแสของแก๊สร้อนเกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับอนุภาคของเชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ และเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง

เนื่องจากในการออกแบบ และพัฒนาหัวเผา (burner) นั้นมีจุดมุ่งหมายสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับหม้อน้ำชนิดท่อไฟแบบวางนอน (horizontal fire tube boiler) ทดแทนหัวเผาเชื้อเพลิงแก๊ส หรือหัวเผาน้ำมันเตา ซึ่งเป็นหัวเผาที่สามารถตอบสนองต่อการปรับเปลี่ยนกำลังความร้อนได้อย่างรวดเร็ว โดยหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) จะรักษาเสถียรภาพฐานของเปลวไฟโดยอาศัยการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการพาความร้อน (convection heat transfer) ระหว่างกระแสหมุนวนของแก๊สร้อน และอนุภาคของเชื้อเพลิงบริเวณ IRZ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 จึงสามารถตอบโจทย์ในเรื่องของการตอบสนองต่อการปรับเปลี่ยนงานได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากกระแสหมุนวนของแก๊สร้อนภายในห้องเผาไหม้ช่วยมีความเร็วที่ค่อนข้างสูง จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนเกิดขึ้นในอัตราที่สูง ในขณะที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วยจะมีมวลของอากาศเย็นไหลเข้าอยู่ตลอดเวลา อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยไม่สูงมากนัก อัตราการแผ่รังสีความร้อนจึงเกิดขึ้นในปริมาณต่ำ เมื่อเทียบกับการพาความร้อน (อัตราการแผ่รังสีความร้อนแปรผันตามกำลังสี่ของอุณหภูมิ) รวมถึงห้องเผาไหม้ช่วยเป็นห้องเผาไหม้ที่มีขนาดเล็ก อัตราการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนบริเวณเปลือกของห้องเผาไหม้ช่วยจึงค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับห้องเผาไหม้ขนาดใหญ่ จากข้อมูลข้างต้นทำให้ได้ข้อสรุปของการออกแบบหัวเผาดังนี้

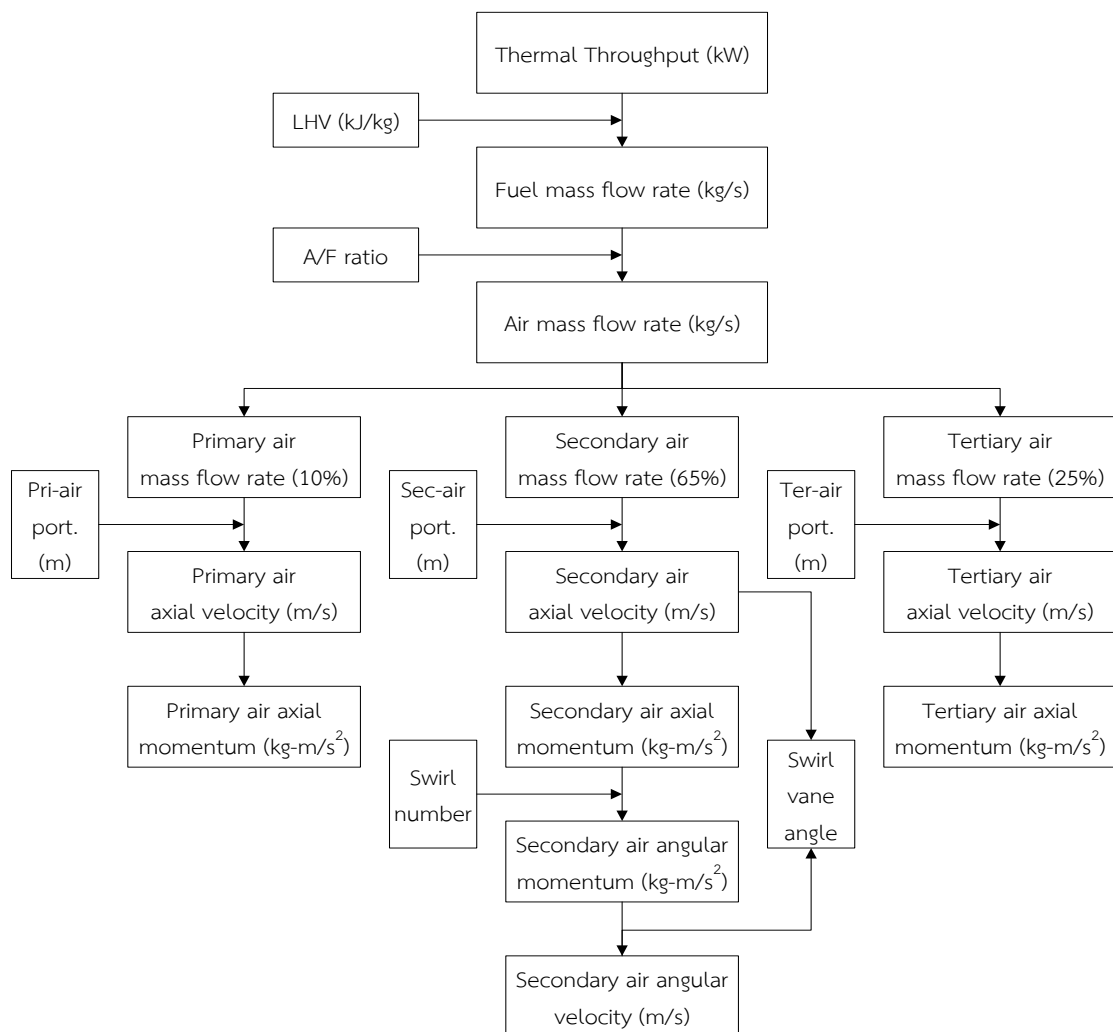
1. ออกแบบหัวเผาให้มีห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ซึ่งเป็นห้องที่ช่วยในการรักษาเสถียรภาพฐานของเปลวไฟ

2. แบ่งอากาศออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

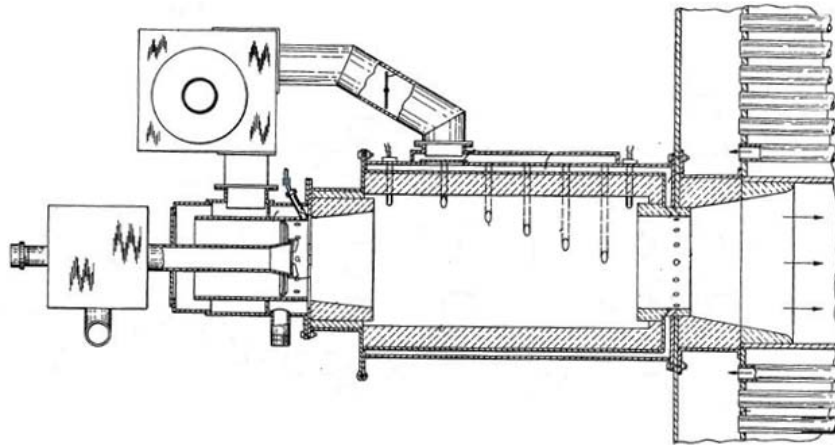
- อากาศส่วนที่หนึ่ง (primary air) เป็นอากาศที่นำเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้
- อากาศส่วนที่สอง (secondary air) เป็นอากาศหลักที่ใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งจะออกแบบให้อากาศไหลผ่านใบพัด (swirl blades) ส่งผลให้อากาศส่วนนี้เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยในลักษณะที่มีการหมุนควง
- อากาศส่วนที่สาม (tertiary air) ทำหน้าที่หล่อเย็นห้องเผาไหม้ช่วย และเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ช่วย

4.2.2 การคำนวณเพื่อการออกแบบ

จากหัวข้อที่ผ่านมาทำให้ทราบถึง อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล และข้อสรุปของแนวคิดในการออกแบบหัวเผา เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.2 ขั้นตอนในการคำนวณเพื่อออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล พบว่าสิ่งแรกที่ต้องทราบคือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (LHV) และอัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิง ซึ่งจะเป็นตัวแปรที่จะนำไปสู่การคำนวณหาปริมาณอากาศที่ต้องการใช้ในการเผาไหม้ รวมไปถึงการคำนวณขนาดของส่วนประกอบต่างๆของหัวเผา สำหรับการคำนวณในเบื้องต้นจะใช้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 4.1 และใช้อัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิงที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.4 ซึ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อให้ได้กำลังความร้อนที่ 1 MW จะได้ผลการคำนวณออกแบบดังตารางที่ 4.3 โดยที่แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการหาขนาด และปริมาณของห้องเผาไหม้ช่วยที่มีความเหมาะสม



ภาพที่ 4.2 ขั้นตอนในการคำนวณเพื่อออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล



ภาพที่ 4.3 ตัวอย่างหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย [15]

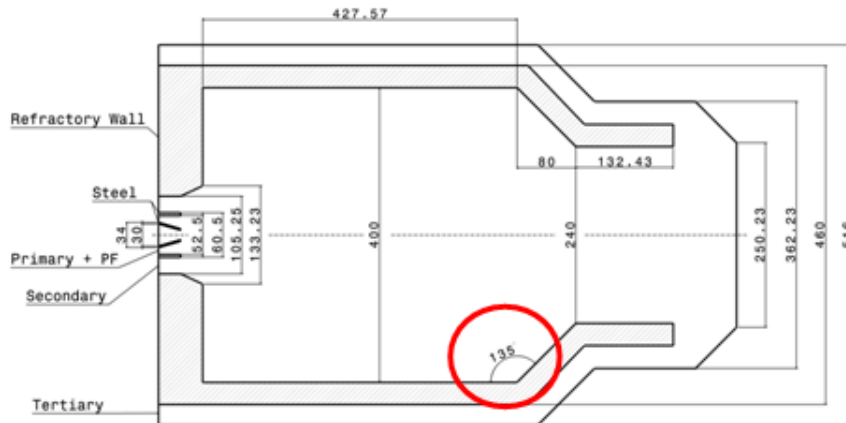
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณการออกแบบหัวเผาขนาด 1 MW ภายใต้สภาวะอากาศเกิน 30%

Fuel mass flow rate, kg/sec		0.06
Air flow rate, kg/sec		0.46
Air volume flow, m ³ /sec		0.40
พิจารณาที่ Primary Air	Pri. air volume flow, m ³ /sec	0.04
	Pri. air port, m ²	9.40×10^{-4}
	Pri. Air axial Velocity, m/sec	42.63
	Pri. Air axial momentum, kg-m/s ²	1.94
พิจารณาที่ Secondary Air	Sec. air volume flow, m ³ /sec	0.267
	Sec. air port, m ²	0.011
	Sec. Air axial Velocity, m/sec	23.77
	Sec. air axial momentum, kg-m/s ²	7.04
	Sec. air Angular momentum, kg-m/s ²	7.26
	Sec. air Angular velocity, m/sec	24.48
	Swirl vane angle	50.8°
พิจารณาที่ Tertiary Air	Ter. air volume flow, m ³ /sec	0.10
	Ter. air port, m ²	0.025
	Ter. air axial Velocity, m/sec	3.92
	Ter. air axial momentum, kg-m/s ²	0.45

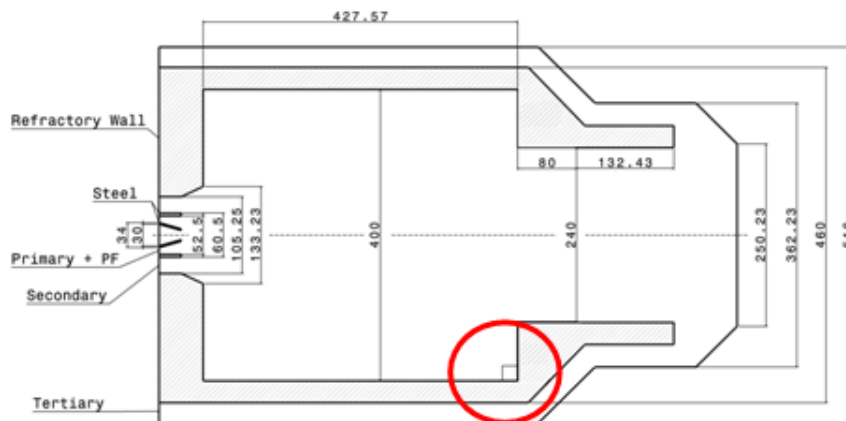
4.2.3 การจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง [12]

หลังจากที่ได้ทำการคำนวณเพื่อออกแบบหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) จนได้ข้อมูลการออกแบบในเบื้องต้นดังแสดงในตารางที่ 4.3 สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงการนำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง มาทำนายถึงความเป็นไปได้ในการเผาไหม้และปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย จะส่งผลให้ได้มาซึ่งขนาด (dimension) ของหัวเผาและห้องเผาไหม้ รวมไปถึงค่าตัวแปรต่างๆที่จะนำไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ส่วนอื่นๆต่อไป

สำหรับการจำลองในเบื้องต้นได้รับความร่วมมือจาก ธนภัทร์ รักดีวรวงค์ [12] ซึ่งเป็นหนึ่งในทีมวิจัย ได้นำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการเผาไหม้ ที่ผ่านการจำลองเทียบเคียงกับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินผงมาประยุกต์ใช้กับการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง สำหรับหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ขนาด 1 MW โดยได้ทำการเปรียบเทียบหัวเผาที่มีมุมผนังทางออกที่แตกต่างกันระหว่างมุม 135 องศา กับมุม 90 องศา ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



(a) I.



(b) I.

ภาพที่ 4.4 ลักษณะของหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (unit in mm.) (a) หัวเผาที่มีมุมผนังทางออก 135 องศา และ (b) หัวเผาที่มีมุมผนังทางออก 90 องศา

4.2.3.1 เงื่อนไขในการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง [12]

สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่ถูกนำมาใช้ในการจำลองคือหญ้าเนเปียร์ คุณสมบัติของหญ้าเนเปียร์แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์เชื้อเพลิงโดย Thailand Institute of Scientific and Technological Research สำหรับเงื่อนไขในการจำลอง ได้แก่ การไหลกำหนดให้เป็นแบบสมมาตรรอบแนวแกน 2 มิติ (2D Axis Symmetric) ที่สภาวะคงตัว (Steady State) แบบจำลองการเผาไหม้ Species Transport และแบบจำลองการปั่นป่วน $k-\epsilon$ Standard โดยมีการเพิ่มค่าคงที่ของอัตราการแพร่ออกซิเจนภายในพื้นผิวอนุภาคคาร์ (C_1) และอัตราจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของคาร์ (C_2) เพิ่มขึ้น 2.5 เท่าจากค่าเริ่มต้น และใช้แบบจำลองการติดตามแบบสุ่ม (Random Walk) ในขณะที่

ขนาดของอนุภาค (Particle Size Distribution) และ Kinetic Parameters ได้ถูกกำหนดให้ใช้ในลักษณะเดียวกันกับกรณีถ่านหิน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.6 ตามลำดับ โดยเงื่อนไขที่ใช้สำหรับการจำลองของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลถูกสรุปไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของถ่านหิน [12]

Particle Size Distribution (μm)	(% โดยน้ำหนัก)
0-10	15.0
10-25	25.0
25-40	20.0
40-75	20.0
>75	20.0

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขการจำลองสำหรับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล [12]

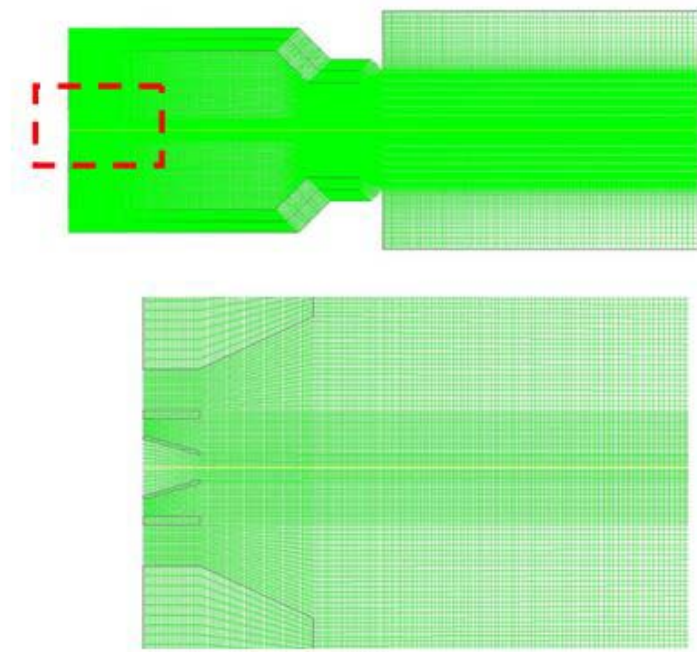
Primary pipe:	Air flow rate (kg/s)	6.613×10^{-2}
	Swirl number	-
	อุณหภูมิ (K)	308
	อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/s)	5.807×10^{-2}
Secondary pipe:	Air flow rate (kg/s)	2.645×10^{-1}
	Swirl number	1.03
	อุณหภูมิ (K)	308
Tertiary pipe:	Air flow rate (kg/s)	1.102×10^{-1}
	Swirl number	-
	อุณหภูมิ (K)	308
อากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ (%)		30

ตารางที่ 4.6 Kinetic Parameters สำหรับแบบจำลองการเผาไหม้ถ่านหิน [12]

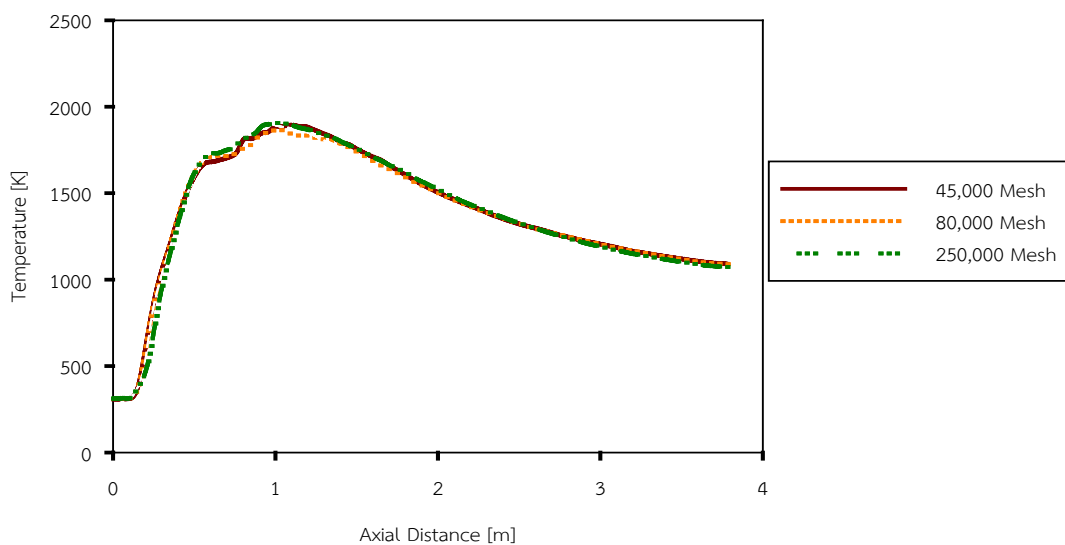
<u>Kinetic parameters :</u>	
Devolatilization, E_{devol} (J/kg-mol)	7.40×10^7
Pre-Exponential Factor	3.82×10^5
Char reaction, E (J/kg-mol)	7.90×10^7

4.2.3.3 ลักษณะของกริดที่ใช้ในการจำลอง

สำหรับกริดที่ใช้ในการจำลองนั้น จะมีความละเอียดประมาณ 45,000 และมีความละเอียดมากเป็นพิเศษที่บริเวณหัวเผา เนื่องจากบริเวณนี้เป็นจุดที่คาดว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลในอัตราที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.5 ซึ่งตัวเลขความละเอียดดังกล่าวเคยผ่านการพิสูจน์โดยทำการเปรียบเทียบกับกริดที่มีความละเอียดประมาณ 250,000 ก่อนหน้านี้แล้ว ดังแสดงในภาพที่ 4.6 โดยให้ผลของการจำลองที่ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงได้ใช้กริดที่มีความละเอียดเท่ากับ 45,000 ในการจำลอง เพื่อที่จะลดระยะเวลาในการคำนวณ



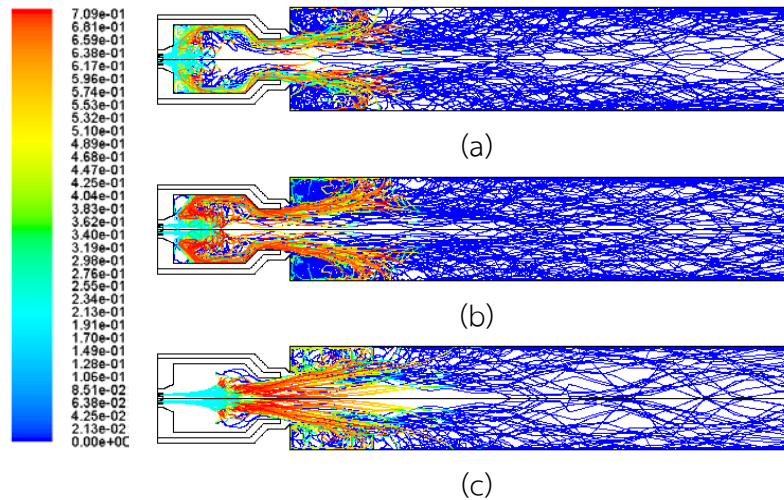
ภาพที่ 4.5 ลักษณะของกริดที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล



ภาพที่ 4.6 การวิเคราะห์จำนวนกริดที่เหมาะสมโดยพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนว Axial ของเตาเผา

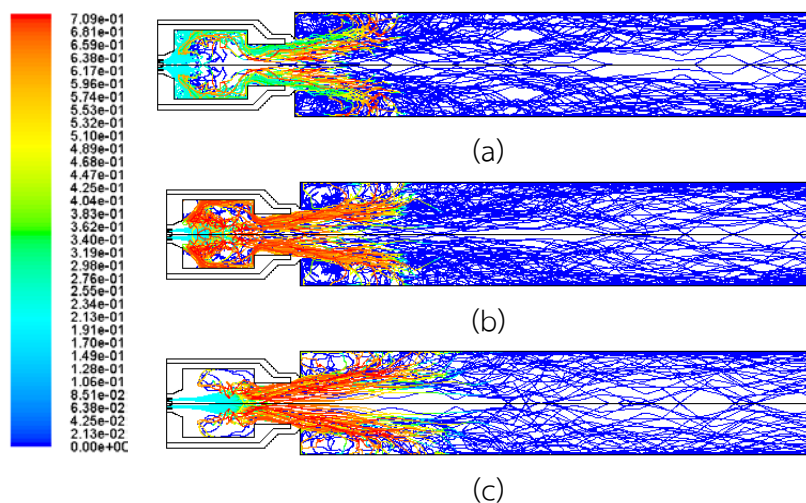
4.2.3.4 ผลการจำลองของหัวเผาที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 135 และ 90 องศา

จากผลการจำลองของหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 135 องศา พบว่าหัวเผาไม่สามารถคงความเสถียรภายในการเผาไหม้ไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการเป่าดับ เนื่องจากระยะเวลาการเผาไหม้ และการฟุ้งกระจายของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้อาจจะน้อยเกินไป ดังแสดงในภาพที่ 4.7 จึงทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงหลุดลอยออกจากช่วงที่มีการผสมผสานกันระหว่างการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุทำให้ไม่สามารถรักษาคอนจูมิจูดติด (Ignition) เอาไว้ได้

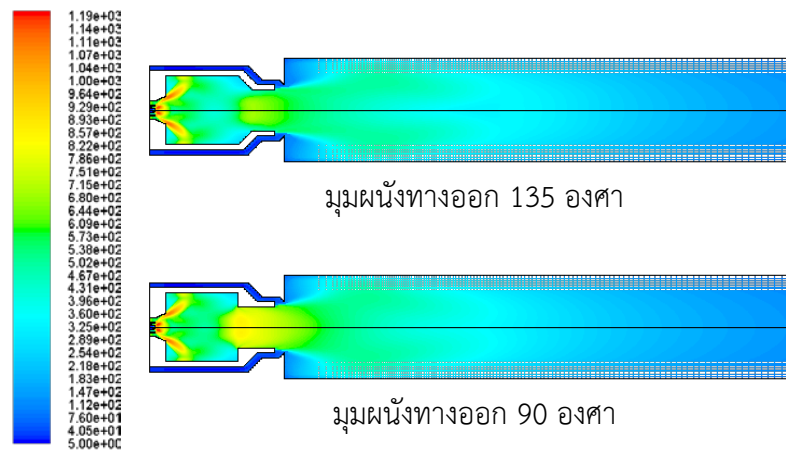


ภาพที่ 4.7 เส้นทางการเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคชาร์ (มุมผนัง 135°); (a) อนุภาคขนาดเล็ก 10 - 30, (b) กลาง 40 - 70 และ (c) ใหญ่ 80 - 100 ไมครอน

หลังจากที่ทราบถึงสาเหตุของปรากฏการณ์การเป่าดับ จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนมุมของผนังบริเวณทางออกเป็น 90 องศา โดยหวังว่าจะเป็นการเพิ่มการฟุ้งกระจายของอนุภาค และระยะเวลาในการเผาไหม้ ซึ่งผลก็ปรากฏว่าหัวเผาที่มุมผนังดังกล่าวสามารถรักษาความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้โดยไม่มีการเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบภาพที่ 4.7 กับภาพที่ 4.8 ซึ่งแสดงเส้นทางการเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคชาร์ระหว่างการเผาไหม้สำหรับหัวเผในห้องเผาไหม้ช่วยที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 135 และ 90 องศาตามลำดับ โดยที่สังเกตเห็นว่าทั้งสองรูปมีการกระจายตัวของอนุภาคบริเวณ IRZ และ ERZ ภายในห้องเผาไหม้ แต่จะพบว่าผนัง 90 องศาจะเป็นตัวขวางกั้นให้อนุภาคขนาดใหญ่มีการฟุ้งกระจายภายในเตามากกว่ากรณีมุมผนัง 135° องศา ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 4.9 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบถึงการกระจายตัวของความเข้มข้นของความปั่นป่วนพบว่าห้องเผาไหม้ช่วยที่มีผนังทางออก 90 องศาจะมีความเข้มข้นของความปั่นป่วนสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน



ภาพที่ 4.8 เส้นทางการเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคชาร์ (มุมผนัง 90°); (a) อนุภาคขนาดเล็ก 10 - 30, (b) กลาง 40 - 70 และ (c) ใหญ่ 80 - 100 ไมครอน



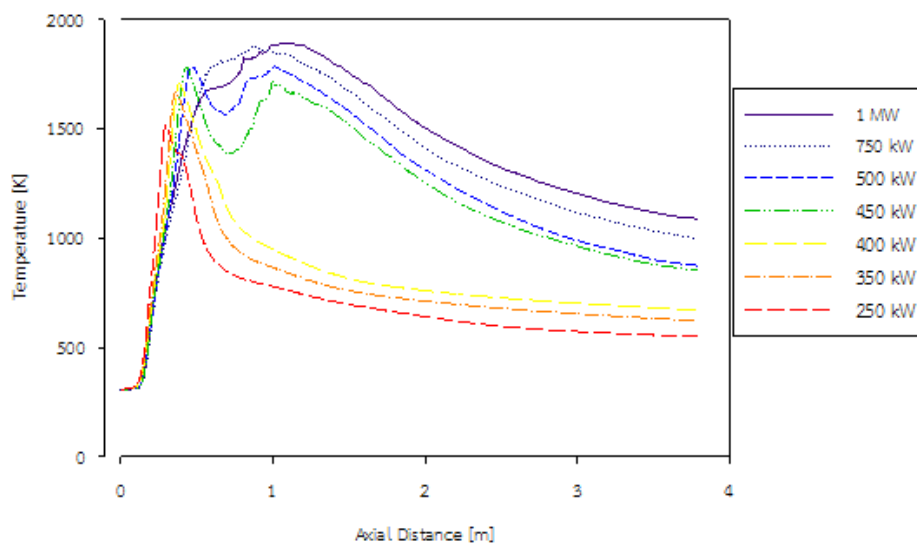
ภาพที่ 4.9 การเปรียบเทียบถึงการกระจายตัวของความเข้มข้นของความปั่นป่วน

4.2.4 การจำลองย่านการทำงานของหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา

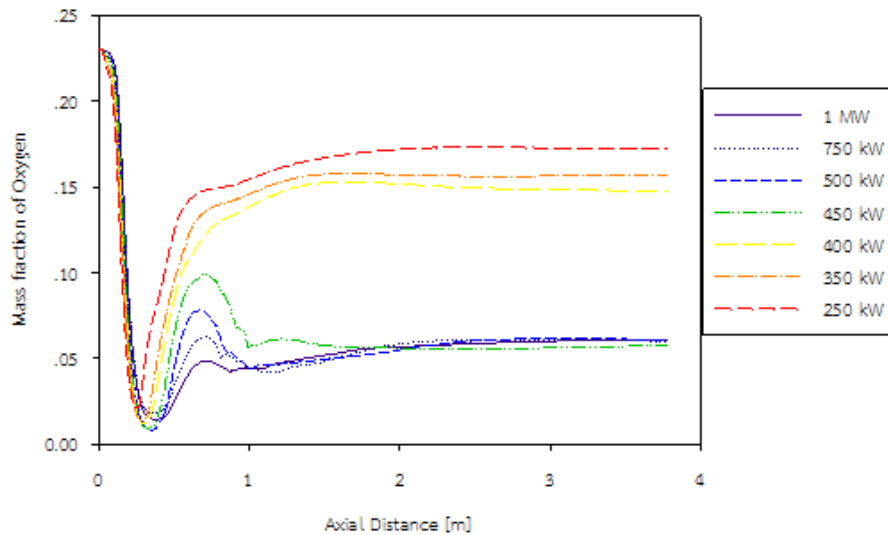
4.2.4.1 ผลการจำลองย่านการทำงานของหัวเผา

จากผลการจำลองในหัวข้อที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าหัวเผาท้องเผาไหม้ช่วย ขนาด 1 MW ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา สามารถรักษาเสถียรภาพของการเผาไหม้ไว้ได้ โดยไม่เกิดปรากฏการณ์เป่าดับ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเป็นการจำลองเพื่อหาเงื่อนไขการทำงานที่มีความเหมาะสมกับหัวเผาดังกล่าว โดยใช้เงื่อนไขการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2.3.1 ซึ่งจะทำให้การจำลองที่ค่ากำลังความร้อนจากการเผาไหม้ในช่วง 250 kW จนถึง 1.25 MW

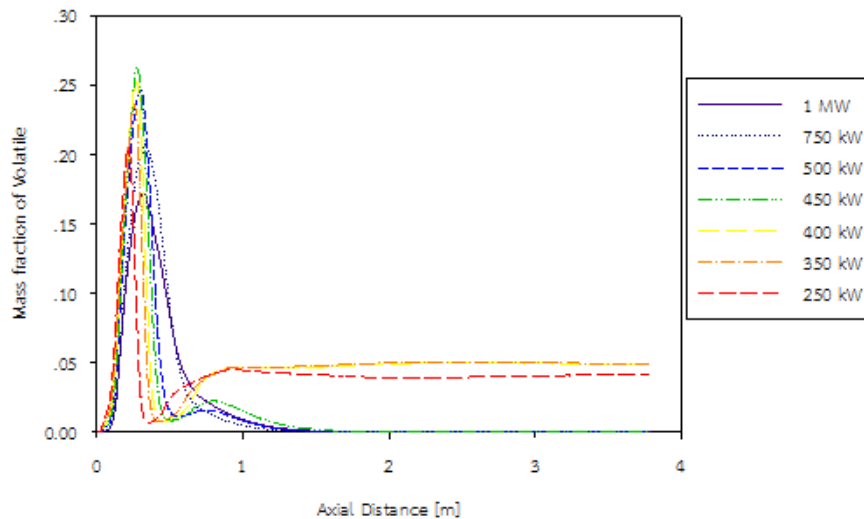
จากภาพที่ 4.10 - 4.12 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ การกระจายตัวของความเข้มข้นของออกซิเจน และการกระจายตัวของสารระเหยตามแนวแกนของเตาเผาตามลำดับ ซึ่งจากรูปทั้งสามจะสังเกตเห็นพฤติกรรมการเผาไหม้เป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นการเผาไหม้ในช่วง 450 kW ถึง 1 MW และกลุ่มที่สองในช่วง 250 kW ถึง 400 kW



ภาพที่ 4.10 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผา

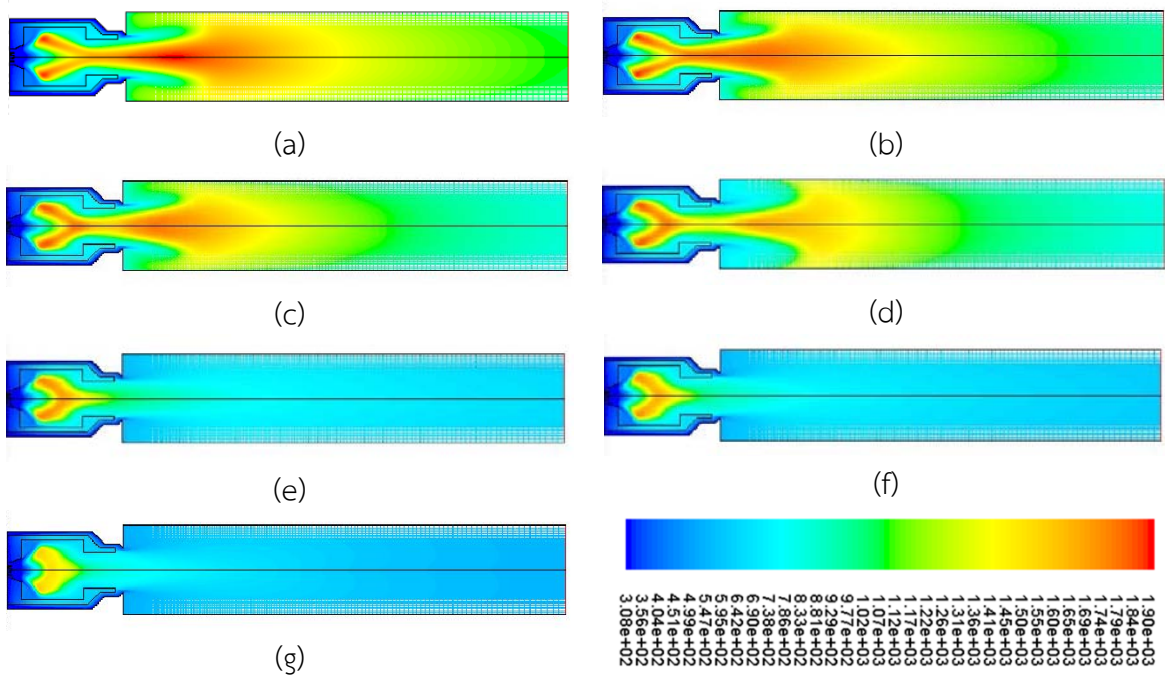


ภาพที่ 4.11 ลักษณะการกระจายตัวของความเข้มข้นของออกซิเจนตามแนวแกนของเตาเผา

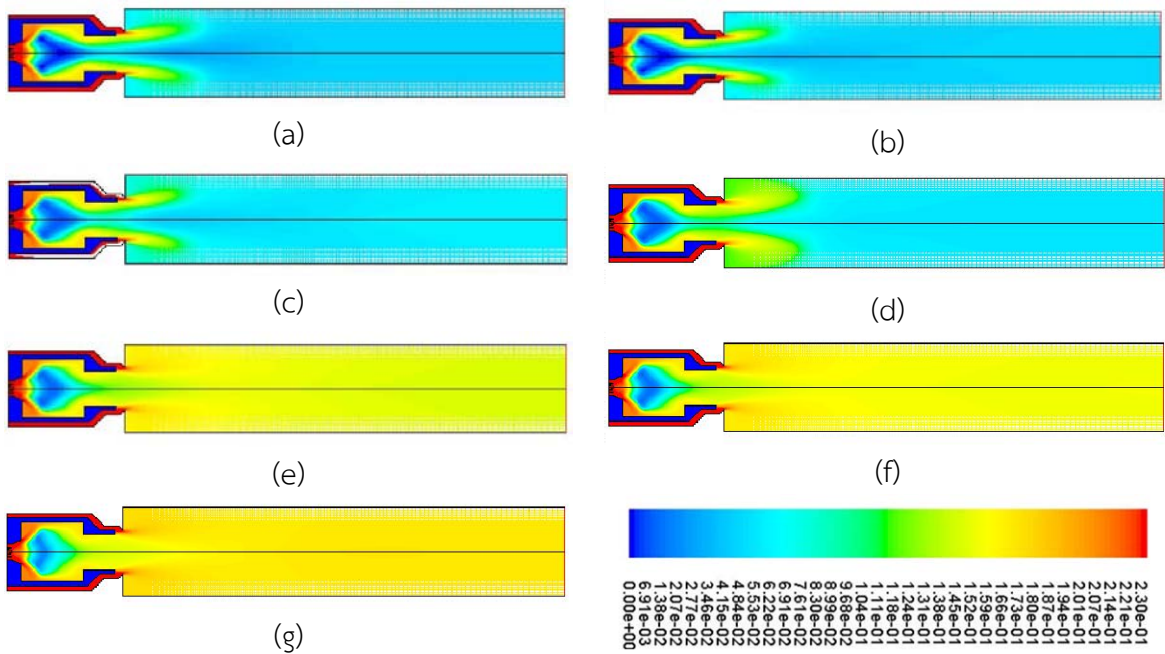


ภาพที่ 4.12 ลักษณะการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหยตามแนวแกนของเตาเผา

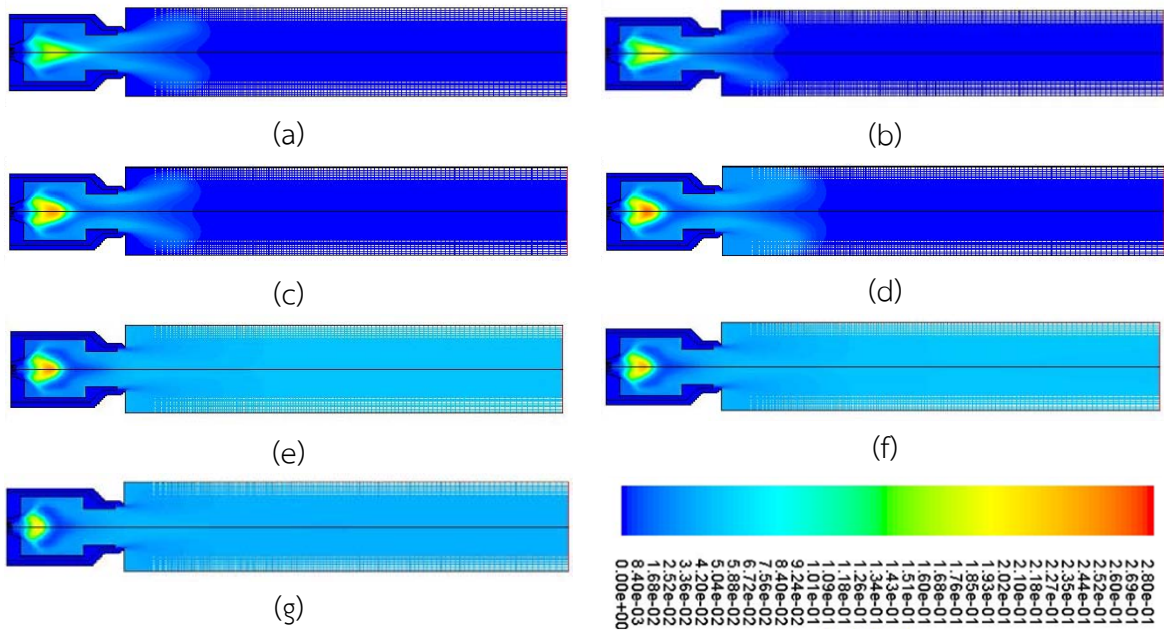
กลุ่มที่หนึ่งในช่วง 450 kW ถึง 1 MW ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของเปลวไฟที่ 1 MW จะมีค่าสูงที่สุดในขณะที่สภาวะ 450 kW จะให้อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดในกลุ่ม ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน และสารระเหย เมื่ออุณหภูมิยิ่งสูงการเผาไหม้ยิ่งเกิดความร้อนมากขึ้น ดังนั้นปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนและสารระเหยที่สภาวะ 1 MW จึงมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะอื่นๆ ในกลุ่ม เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ จะพบว่าการเผาไหม้ในเตาจะเกิดขึ้นสองช่วง การเผาไหม้ช่วงแรกจะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของห้องเผาไหม้ช่วย ในขณะที่จะมีอนุภาคของเชื้อเพลิงบางส่วนถูกอิทธิพลของอากาศที่หมุนควงเหวี่ยงไปชนกับผนังของห้องเผาไหม้ช่วย และวิ่งขนานกับผนังออกไป ส่งผลให้อนุภาคส่วนนี้จึงไม่ได้รับการเผาไหม้ในช่วงดังกล่าว ในส่วนของการเผาไหม้ช่วงที่สองจะเกิดขึ้นในบริเวณส่วนต้นของท่อไฟใหญ่ ซึ่งอนุภาคเชื้อเพลิงที่หลุดจากการเผาไหม้ในช่วงแรกจะถูกเผาไหม้ในบริเวณนี้จนหมด ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของสารระเหยที่ลดลงจนหมดหลังจากผ่านบริเวณนี้ไป ซึ่งถือได้ว่าพฤติกรรมของการเผาไหม้ของกลุ่มนี้เป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์



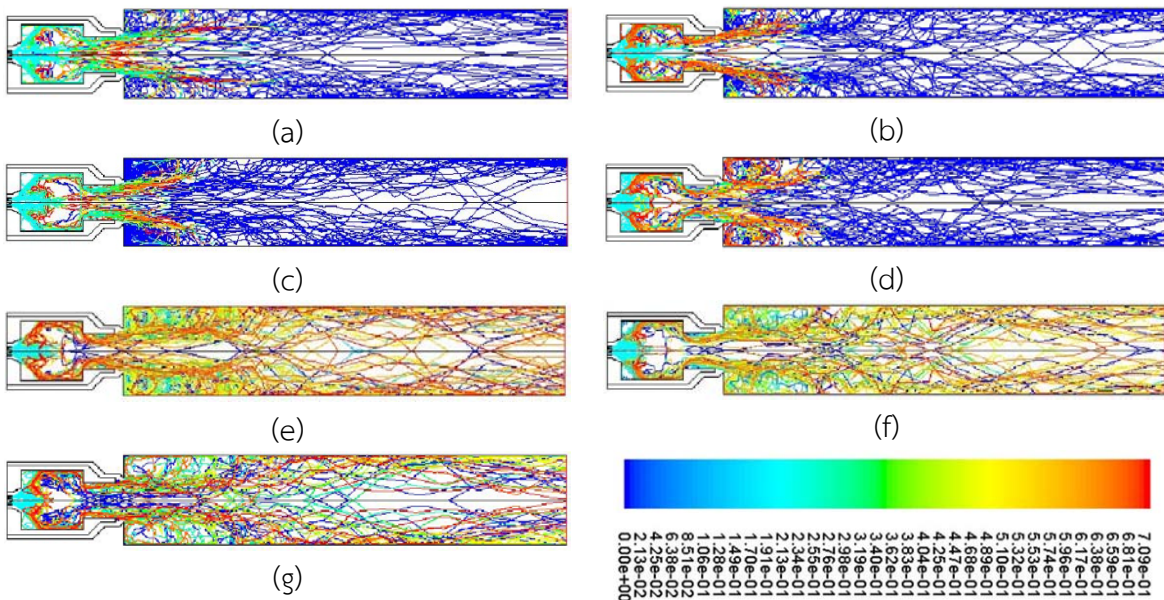
ภาพที่ 4.13 การกระจายตัวของอุณหภูมิ [K] (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW



ภาพที่ 4.14 การกระจายตัวของความเข้มข้นออกซิเจน (Mass Fraction) (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW



ภาพที่ 4.15 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหย (Mass Fraction) (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW



ภาพที่ 4.16 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของชาร์ (Particle Char Fraction) (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW

ในส่วนของการพฤติกรรมการเผาไหม้กลุ่มที่สองจะเป็นการเผาไหม้ที่สภาวะ 250 kW ถึง 400 kW ซึ่งอุณหภูมิของการเผาไหม้ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกลุ่มแรก เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ จะพบว่าการเผาไหม้จะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของห้องเผาไหม้ช่วยเพียงช่วงเดียว ส่งผลให้อนุภาคของเชื้อเพลิงที่ถูกอิทธิพลของอากาศหมุนควงเหวี่ยงไปชนกับผนังของห้องเผาไหม้ช่วยจะไม่ได้รับการเผาไหม้ จึงทำให้มีปริมาณสารระเหยหลงเหลืออยู่ ดังนั้นอาจถือได้ว่าการพฤติกรรมการเผาไหม้ของกลุ่มนี้เป็นเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.16 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของชาร์ (Particle Char Fraction) พบว่าที่สภาวะ 1 MW, 750 kW, 500 kW และ 450 kW อนุภาคชาร์จะถูกเผาไหม้จนหมด ในขณะที่สภาวะ 400 kW 350 kW และ 250 kW นั้นจะเหลืออนุภาคชาร์ที่ไม่ได้รับการเผาไหม้หลงเหลืออยู่พอสมควร ซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิงที่ถูกอิทธิพลของ swirl เหวี่ยงไปชนกับผนังของห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำจึงไม่ได้รับการเผาไหม้ ซึ่งเป็นเหตุผลที่สอดคล้องกับปริมาณสารระเหยที่ได้กล่าวไว้ในเบื้องต้น นอกจากนี้เมื่อทำการจำลองการเผาไหม้ที่สภาวะ 1.25 kW พบว่าหัวเผาไม่สามารถคงความเสถียรภายในการเผาไหม้ไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์การเป่าดับ (Blow-Off) ในลักษณะเช่นเดียวกับกรณี ของหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วยที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 135 องศาเนื่องจากความเร็วก๊าซสูงเกินไปภายในห้องเผาไหม้ จึงทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงหลุดลอยออกจากบริเวณที่ต้องการให้มีการผสมผสานกันระหว่างการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุทำให้อนุภาคน้ำมันไม่อาจรักษาการจุดติด (Ignition) ไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ลักษณะดังกล่าว

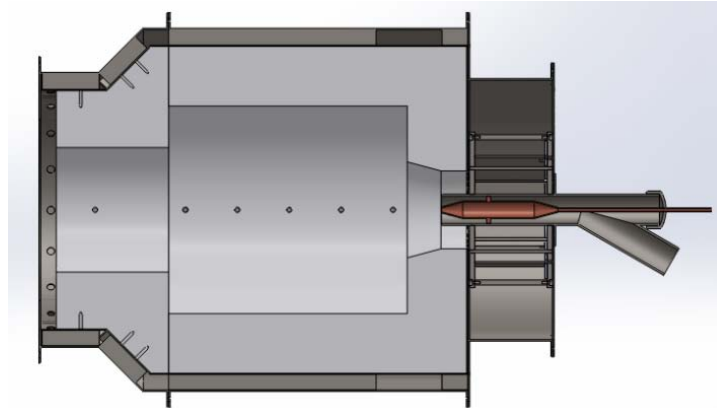
4.2.4.2 สรุปผลการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

จากผลการจำลองสำหรับหัวเผานี้มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา สามารถทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคมากขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย เนื่องจากผนัง ณ บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ช่วยได้กั้นขวางเส้นทางเดินของอนุภาคได้บางส่วน จึงเป็นสาเหตุทำให้อนุภาคบางส่วนมีเส้นทางเดินแบบย้อนกลับและมีระยะเวลาในการเดินทางของอนุภาคมากขึ้น จึงทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ (residence time) ภายในห้องเผาไหม้ช่วยเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้มีการปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็วภายในห้องเผาไหม้ช่วย และทำให้การกระจายตัวของอนุภาคสูงขึ้นในบริเวณนี้เท่ากับ 1894 K ในทำนองเดียวกันนั้นสามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้โดยไม่มีการเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ เมื่อทำการศึกษาเพื่อหาขนาดการทำงานที่เหมาะสมสำหรับหัวเผาที่ทำการศึกษาจากผลการจำลองพบว่าหัวเผานี้มีขนาดการทำงานอยู่ระหว่าง 450 kW ถึง 1 MW ซึ่งจะเป็นช่วงที่หัวเผาสามารถรักษาเสถียรภาพในการเผาไหม้ และให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งหากเพิ่มกำลังความร้อนจากการเผาไหม้สูงกว่า 1 MW จะเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ แต่หากลดกำลังความร้อนจนต่ำกว่า 450 kW จะเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้อนุภาคชาร์และสารระเหยหลงเหลือ ซึ่งถือเป็นการทิ้งพลังงานในส่วนดังกล่าวไปโดยไร้ประโยชน์

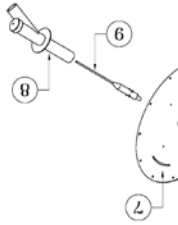
จากที่ผ่านมามาดูจะเห็นว่าทางทีมวิจัยทำการพัฒนาหัวเผาโดยใช้เชื้อเพลิง 2 ชนิด คือถ่านหินกับหญ้าเนเปียร์ โดยใช้ผลการจำลองการเผาไหม้ถ่านหิน และหญ้าเนเปียร์ที่มีข้อมูลมาจาก [3] ดังนั้นต้นแบบหัวเผาที่จะทำการผลิตขึ้น จะต้องได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถเผาไหม้ได้ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองหรือไม่ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงที่จะนำมาทดสอบ ซึ่งในอนาคตต้องมีการปรับปรุงคุณลักษณะของเชื้อเพลิงในแบบจำลองอีกครั้ง หลังจากที่ได้ทำการทดลองจริง

4.2.5 รายละเอียดแบบสั่งผลิต (Details Drawing) สำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล

หลังจากที่ทำการคำนวณเพื่อออกแบบ และทำการจำลองเพื่อทำนายปรากฏการณ์ แนวโน้มหรือความเป็นไปได้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงผงของหัวเผา รวมไปถึงสมรรถนะ และย่านการทำงานที่มีความเหมาะสมกับหัวเผา จนได้ผลที่หน้าพอใจแล้ว ลำดับต่อไปจะขั้นตอนของการเขียนแบบสำหรับสั่งผลิตหัวเผาดังกล่าว โดยที่การเขียนแบบจำเป็นต้องคำนึงถึงกระบวนการผลิต ชิ้นส่วนมาตรฐานในตลาดอุตสาหกรรมของประเทศ ต้องให้รายละเอียดที่มีถูกต้อง และความชัดเจน และนอกจากนี้ในการออกแบบยังต้องคำนึงถึงความสะดวกในการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนต่างๆของหัวเผ่อีกด้วย



ภาพที่ 4.17 แสดงภาพตัดของหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber)



ภาพที่ 4.18 ส่วนประกอบของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย

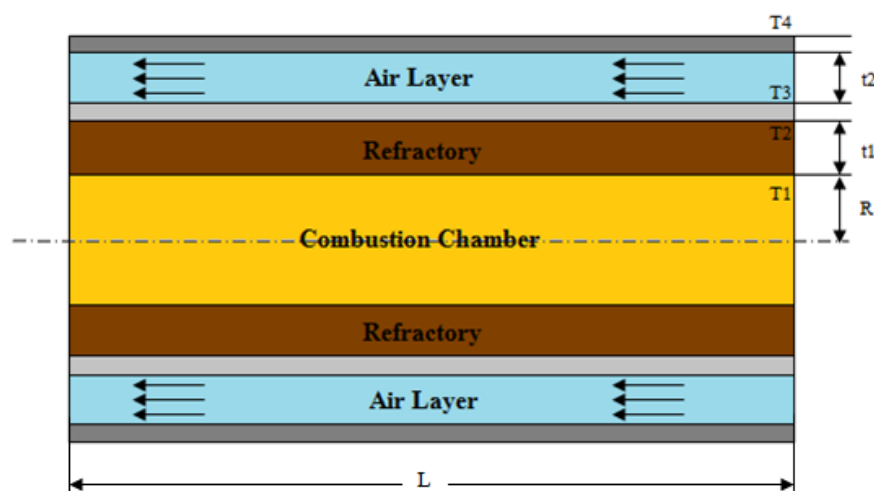
เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.17 และภาพที่ 4.18 ลักษณะของหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) พบว่าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลักๆ 8 ชิ้นด้วยกัน ดังนี้

1. Burner Nozzle Jacket คือ ชิ้นส่วนที่ใช้เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างหัวเผา (burner) กับเตาเผา ซึ่งตรงส่วนนี้จะมีครีปที่เป็นตัวรับน้ำหนักของปูนทนไฟ และคอยช่วยกำหนดทิศทางของอากาศส่วนที่สามติดอยู่ด้วย
2. Refractory Nozzle Sheet คือ แบบสำหรับการหล่อปูนทนไฟบริเวณทางออกของหัวเผา ซึ่งผนังทางออก 90 องศาจะติดอยู่กับชิ้นส่วนนี้
3. Burner Main Jacket คือ ช่องทางเข้าของอากาศส่วนที่สาม ซึ่งภายในจะมีครีปที่เป็นตัวรับน้ำหนักของปูนทนไฟ และคอยควบคุมทิศทางการไหลติดอยู่
4. Main Refractory Wall ทำหน้าที่เป็นเปลือกของห้องเผาไหม้ช่วย และเป็นแบบสำหรับหล่อผนังปูนทนไฟ
5. Swirl Box คือ ช่องทางเข้าของอากาศส่วนที่สอง ก่อนจะป้อนเข้าสู่ Swirl Unit
6. Swirl Unit คือ อุปกรณ์ที่ประกอบด้วยแผ่นใบพัด และกลไกปรับมุมของใบพัด เพื่อช่วยให้อากาศส่วนที่สองเกิดการหมุนควงก่อนเข้าห้องเผาไหม้ช่วย
7. End Plate คือ แผ่นปิด Swirl Box
8. Pulverized Nozzle คือ หัวฉีดเชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวล

ซึ่งการแยกส่วนประกอบของหัวเผาเป็นหลายชิ้นก็เพื่อให้ง่ายต่อการสร้าง การประกอบ และการบำรุงรักษา รวมไปถึงการปรับปรุงชิ้นส่วนต่างๆ สำหรับการทดลองในอนาคต เช่น มุมทางออกของอากาศส่วนที่สามที่สามารถเปลี่ยนได้โดยการทำชิ้นส่วนหมายเลข 2 ให้มีมุมเปลี่ยนไป เป็นต้น

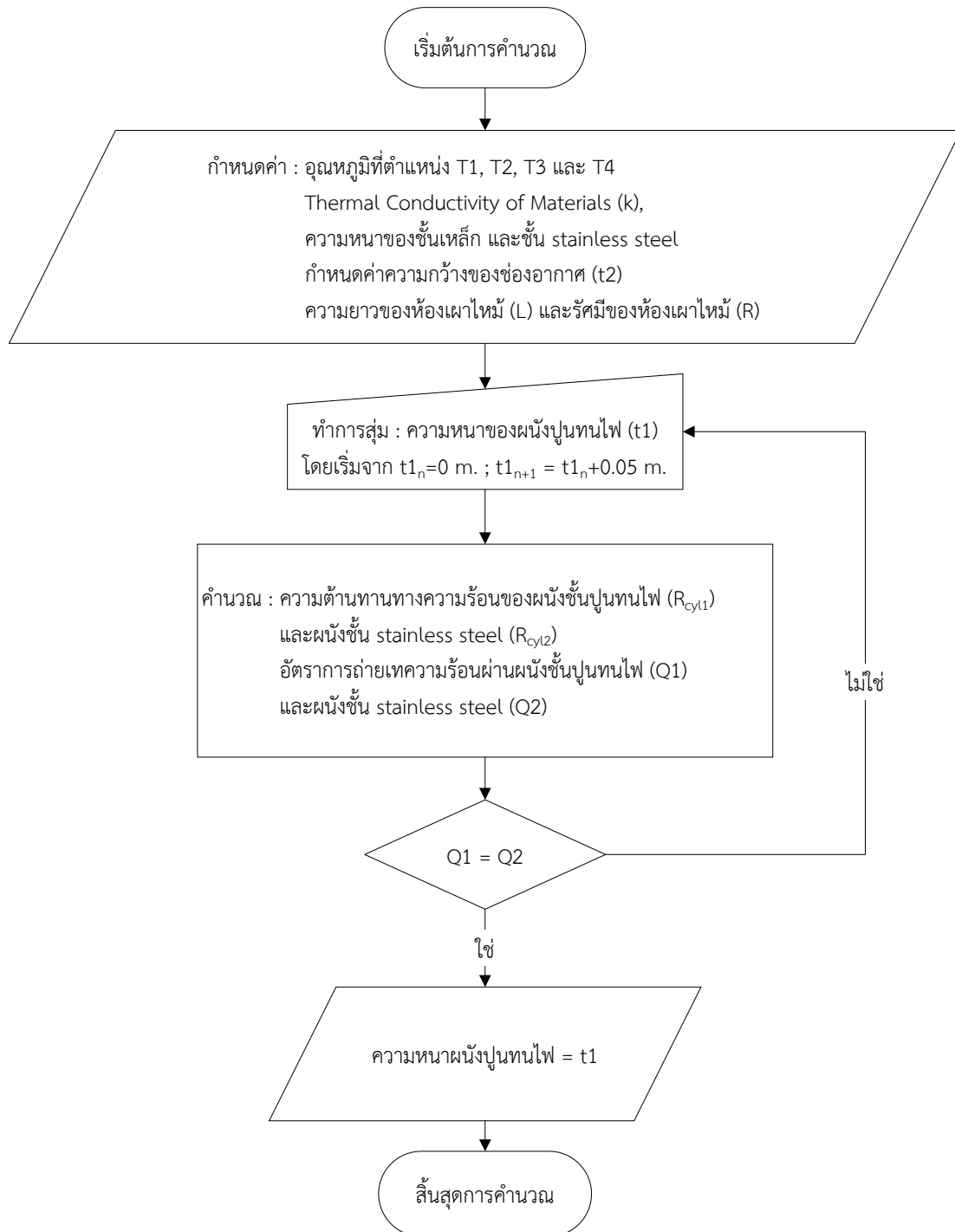
4.2.6 การคำนวณความหนาของผนังห้องเผาไหม้ช่วย

ผนังปูนทนไฟของห้องเผาไหม้ช่วย นั้นเป็นส่วนที่ช่วยเก็บความร้อน และแผ่รังสีความร้อนให้กับอนุภาคเชื้อเพลิงผงที่ถูกพ่นเข้ามาให้ห้องเผาไหม้ ซึ่งจะเป็นตัวช่วยในการรักษาเสถียรภาพฐานของเปลวไฟเอาไว้ด้วย นอกจากนี้ผนังปูนทนไฟยังเปรียบเสมือนเป็นฉนวนกั้นความร้อนที่ห่อหุ้มห้องเผาไหม้เอาไว้ โดยการหุ้มฉนวนนั้นหากทำการหุ้มฉนวนที่มีความหนามากเกินไปจะส่งผลให้หัวเผาที่มีพื้นที่ผิวด้านนอกที่มากขึ้น การสูญเสียความร้อนให้กับบรรยากาศก็จะมีมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการหล่อผนังปูนทนไฟควรคำนวณความหนาให้มีความเหมาะสม เพื่อเป็นการลดการสูญเสียความร้อน และเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการขึ้นรูปชิ้นงานอีกด้วย



ภาพที่ 4.19 ลักษณะขอบเขตของผนังห้องเผาไหม้ช่วย

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.19 จะพบว่าผนังของห้องเผาไหม้ช่วยจะแบ่งออกเป็น 4 ชั้น (layer) ประกอบด้วยชั้นของปูนทนไฟ (refractory wall) ชั้นของ stainless steel ซึ่งเป็นเสื้อของปูนทนไฟ ชั้นของอากาศส่วนที่ 3 และชั้นของเหล็กซึ่งเป็นเปลือกนอกสุดของห้องเผาไหม้ช่วย โดยภาพที่ 4.20 แสดงวิธีการคำนวณเพื่อหาค่าความหนาของผนังปูนทนไฟ

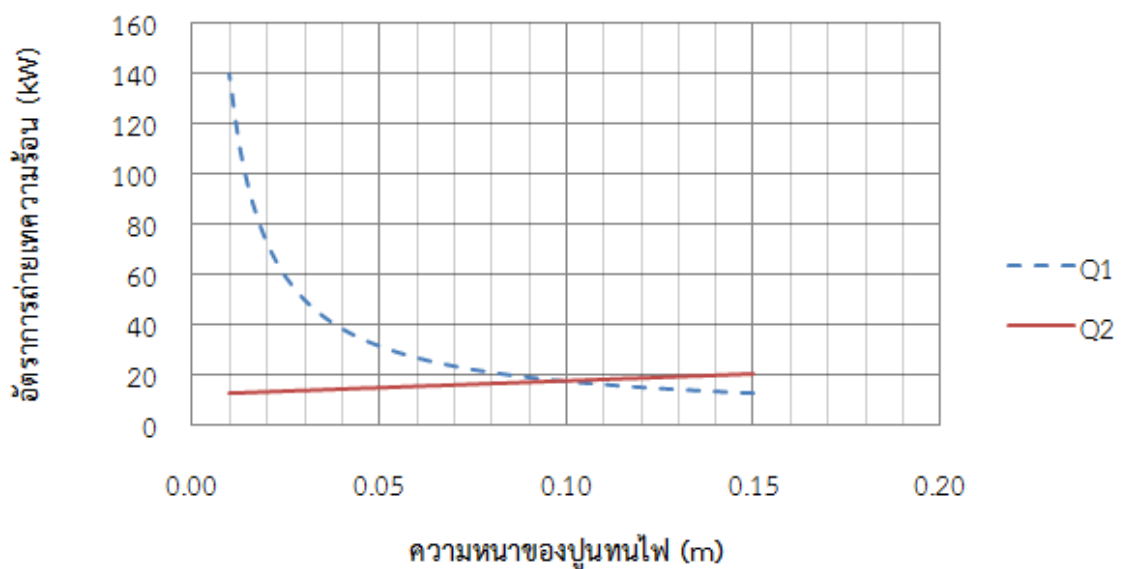


ภาพที่ 4.20 การคำนวณหาความหนาผนังปูนของห้องเผาไหม้ช่วย

ตารางที่ 4.7 ค่าตัวแปรควบคุมที่ใช้คำนวณหาความหนาของผนังห้องเผาไหม้ช่วย

Parameter	Value	Units
Chamber Radiance (R)	0.200	m
Air Layer Distance (t_2)	0.030	m
Stainless Steel Layer Distance	0.003	m
Steel Layer Distance	0.003	m
Chamber Length (L)	0.460	m
Combustion Temperature (T_1)	1500	$^{\circ}\text{C}$
Outside Brick Temperature (T_2)	150	$^{\circ}\text{C}$
Outside Stainless Steel Layer Temperature (T_3)	146	$^{\circ}\text{C}$
Outside Steel Layer Temperature (T_4)	100	$^{\circ}\text{C}$
Air Temperature (T_{air})	40	$^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity of Refractory Brick @ 1200°C	1.800	$\text{W/m.}^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity of Stainless Steel	15	$\text{W/m.}^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity of Steel	60	$\text{W/m.}^{\circ}\text{C}$

ในกรณีที่ผนังห้องเผาไหม้ช่วยมีหลายชั้น ดังนั้นความร้อนจึงต้องไหลผ่านวัสดุทีละชั้น ความต้านทานทางความร้อนจึงเป็นการต่อแบบอนุกรม อัตราการถ่ายเทความร้อนในแต่ละชั้นของผนังจึงมีค่าเท่ากัน เมื่อทำการคำนวณตามขั้นตอนดังภาพที่ 4.21 โดยแทนค่าตัวแปรในตารางที่ 4.7 จะได้ผลการคำนวณดังนี้



ภาพที่ 4.21 ผลการคำนวณหาความหนาผนังปูนทนไฟของห้องเผาไหม้ช่วย

พิจารณาภาพที่ 4.21 ผลการคำนวณหาความหนาของผนังห้องเผาไหม้ช่วย จะพบว่า ความหนาของปูนทนไฟที่ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังปูนทนไฟ (Q1) เท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง stainless steel (Q2) จะมีค่าประมาณ 0.1 m ซึ่งเป็นจุดที่กราฟของทั้งสองสมการมาตัดกันนั่นเอง แต่เมื่อทำการสำรวจขนาดมาตรฐานของอิฐทนไฟที่มีจำหน่ายในประเทศจะไม่พบขนาดดังกล่าว ดังนั้นจึงต้องทำการเลือกใช้ขนาดมาตรฐานของอิฐทนไฟที่มีความใกล้เคียงกับผลการคำนวณที่สุด นั่นคืออิฐขนาด 115 mm. นั่นเอง

เมื่อทำการคำนวณเพื่อออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย จนได้ผลการคำนวณ และขนาดต่างๆที่เป็นที่น่าพอใจแล้ว ลำดับต่อไปจะเข้าสู่ขั้นตอนการเขียนแบบสั่งผลิต และสั่งขึ้นรูปหัวเผาต่อไป

4.3 การออกแบบระบบป้อนเชื้อเพลิง

จากที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้ว นอกเหนือจากหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแล้ว ทางทีมวิจัยภายใต้ความร่วมมือของนักศึกษาปริญญาตรี [16] จะต้องออกแบบระบบสนับสนุนการเผาไหม้ เพื่อให้ระบบสามารถทำการทดสอบได้ ซึ่งรูปแบบของชุดทดสอบดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 4.1 สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบป้อนเชื้อเพลิง ซึ่งการออกแบบระบบนั้นควรจะออกแบบให้มีความเหมาะสมกับชนิดของเชื้อเพลิงที่จะใช้ ซึ่งในที่นี้คือเชื้อเพลิงชีวมวลผง โดยแนวคิดในการออกแบบจะเป็นการสร้างระบบโดยใช้ไซโคลน ถังพักเชื้อเพลิง (hopper) สกรูลำเลียง และการขนถ่ายด้วยลม มาประยุกต์รวมกันในการออกแบบครั้งนี้ เพื่อให้สามารถป้อนระบบเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง โดยขอบเขตขอบการออกแบบประกอบไปด้วย

1. ระบบป้อนเชื้อเพลิงจะใช้กับชีวมวลแบบผง
2. ทำการออกแบบสร้างระบบป้อนเชื้อเพลิงผงเข้าสู่เตาเผาไหม้ชีวมวลในอัตราการไหลเชิงมวลอยู่ที่ประมาณ 0.942 - 3.78 kg/min ซึ่งเมื่อนำไปเผาไหม้จะเทียบเป็นกำลังความร้อนเท่ากับ 250 kW ถึง 1 MW นั่นเอง
3. ถังพักเชื้อเพลิง (hopper) ที่ใช้เก็บเชื้อเพลิง จะต้องสามารถสำรองเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการเผาไหม้ (ที่กำลังความร้อน 1 MW) ได้อย่างต่อเนื่อง 30 นาที

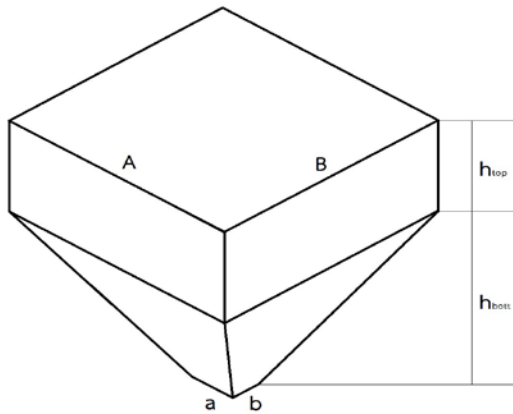
4.3.1 การออกแบบถังพักเชื้อเพลิง

ในการออกแบบถังพักเชื้อเพลิงนั้น มีหลายปัจจัยที่ต้องทำการพิจารณาก่อนทำการออกแบบ ไม่ว่าจะเป็นปริมาตรที่ต้องการ สมบัติของวัสดุ ความหนาแน่น และมุมกองของวัสดุ เป็นต้น สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ใช้ในการทดสอบการเผาไหม้จะมีความหนาแน่นประมาณ 232 kg/m^3 และมีค่าความร้อน (LHV) ประมาณ 15.8 MJ/kg โดยจากขอบเขตที่กำหนดไว้ในข้างต้น อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงสูงสุดจะอยู่ที่ 3.78 kg/min และต้องสำรองเชื้อเพลิงสำหรับการทดสอบการเผาไหม้เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 30 นาที นั่นคือจะต้องจัดเก็บเชื้อเพลิงจำนวน 113.4 kg ดังนั้นถังพักเชื้อเพลิงจะต้องมีปริมาตรอย่างน้อย 0.489 m^3

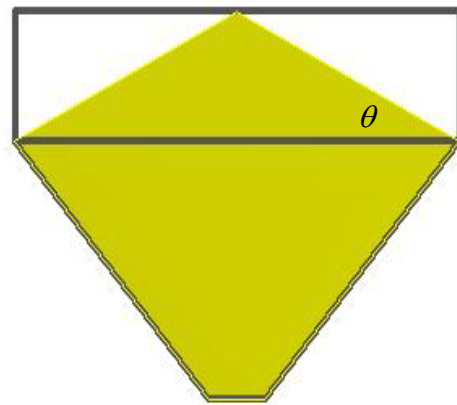


ภาพที่ 4.22 มุมกองของวัสดุ

มวลวัสดุเมื่อถูกเทออกจากภาชนะบรรจุก็จะเกิดการเลื่อนไหลกลายเป็นกองวัสดุตามธรรมชาติ มุมที่พื้นผิวของวัสดุกระทำกับพื้นราบจะ เรียกว่า มุมกองวัสดุ (angle of repose) ซึ่งมุมกองวัสดุนี้จะสามารถบอกถึงคุณสมบัติในการไหลของวัสดุ สามารถนำไปคำนวณหาปริมาตรของวัสดุที่อยู่บนอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุ และในถังเก็บวัสดุได้อีกด้วย เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.22 แสดงมุมกองของกลุ่มตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลผง ซึ่งจากรูปจะพบว่าเชื้อเพลิงดังกล่าวจะมีมุมกองของวัสดุ (θ) อยู่ที่ประมาณ 50 องศา ซึ่งมุมนี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณปริมาตรถังพักเชื้อเพลิงต่อไป



(a)



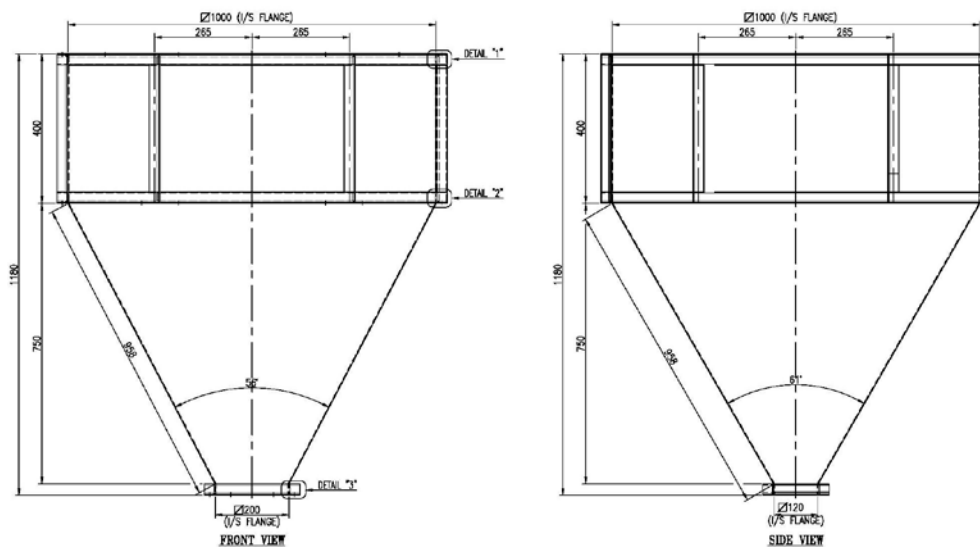
(b)

ภาพที่ 4.23 ลักษณะของถังพักเชื้อเพลิง (hopper) ; (a) ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณขนาด (b) ลักษณะการกองของเชื้อเพลิงที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในถังพัก (hopper)

จากภาพที่ 4.23 กำหนดให้หน้าตัดของช่องทางเข้าเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ระยะ A และ B เท่ากับ 1 เมตร และกำหนดระยะช่องทางออก a และ b ให้เท่ากับ 0.2 และ 0.12 เมตร ตามลำดับ จากนั้นใช้หลักการพื้นฐานทางเลขาคณิตของรูปทรงพีระมิดปลายตัดในการคำนวณหาความสูงของถังพักเชื้อเพลิง ซึ่งการคำนวณจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขของมุมกองของวัสดุ และปริมาตรที่ต้องการ (การคำนวณโดยละเอียดสามารถศึกษาได้จาก แหล่งอ้างอิงที่ [24]) จะได้ขนาดของถังพักเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.24

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณขนาดถังพักเชื้อเพลิง (hopper)

Parameter	Value	Units
ความกว้างของช่องทางเข้าของเชื้อเพลิง (A)	1,000	mm.
ความยาวของช่องทางเข้าของเชื้อเพลิง (B)	1,000	mm.
ความกว้างของช่องทางออกของเชื้อเพลิง (a)	200	mm.
ความยาวของช่องทางออกของเชื้อเพลิง (b)	120	mm.
ความสูงถังพักช่วงบน (h_{top})	400	mm.
ความสูงถังพักช่วงล่าง (h_{bott})	750	mm.
ปริมาตรความจุ	0.444	m^3

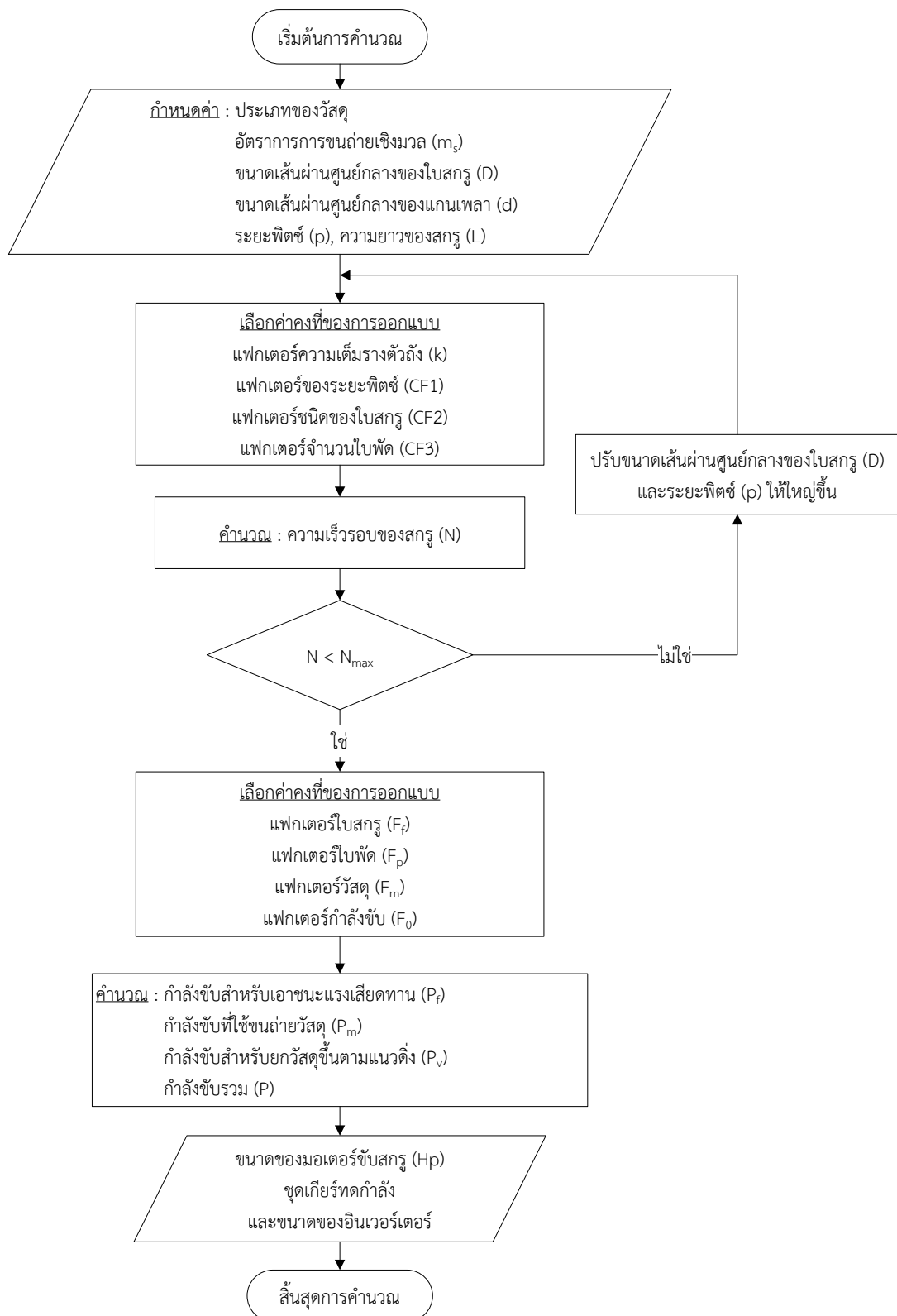


ภาพที่ 4.24 ขนาดของถังพักเชื้อเพลิง (hopper)

หลังจากที่ได้ทำการคำนวณจนได้ขนาดของถังพักเชื้อเพลิงเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อไปต้องทำการเขียนแบบสำหรับสิ่งผลิตถังพักดังกล่าว โดยในการเขียนแบบสิ่งผลิตนั้น ต้องคำนึงถึงวัสดุขนาดมาตรฐานในตลาดอุตสาหกรรมของประเทศ เพื่อให้ง่ายต่อการสั่งซื้อ และนอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงกระบวนการผลิต ดังนั้นในการเขียนแบบต้องให้รายละเอียดที่มีถูกต้อง และชัดเจน ภาพที่ 4.24 นั้นแสดงลักษณะของถังพักเชื้อเพลิงที่ทำการเขียนขึ้นด้วยโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ ซึ่งรายละเอียดของแบบ (detail drawing) ในการสิ่งผลิตนั้นสามารถศึกษาได้จาก [17]

4.3.2 การออกแบบสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิง

สกรูขนถ่ายวัสดุเป็นหนึ่งในวิธีขนถ่ายวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นระบบที่มีความคงทน ง่ายต่อการบำรุงรักษา สามารถกำหนดอัตราการขนถ่ายได้ ขนถ่ายวัสดุได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับวัสดุหลากหลายชนิด ซึ่งในออกแบบสกรูขนถ่ายนั้น จำเป็นต้องทราบถึงสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ทำการขนถ่าย เพื่อนำไปใช้ในจำแนกประเภทของวัสดุ โดยประเภทของวัสดุนั้นจะเป็นตัวช่วยในการเลือกชนิดของสกรู วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปใบสกรู และช่วยกำหนดตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณขนาดของสกรูนั่นเอง ซึ่งวิธีการคำนวณเพื่อออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุนั้น แสดงดังภาพที่ 4.25

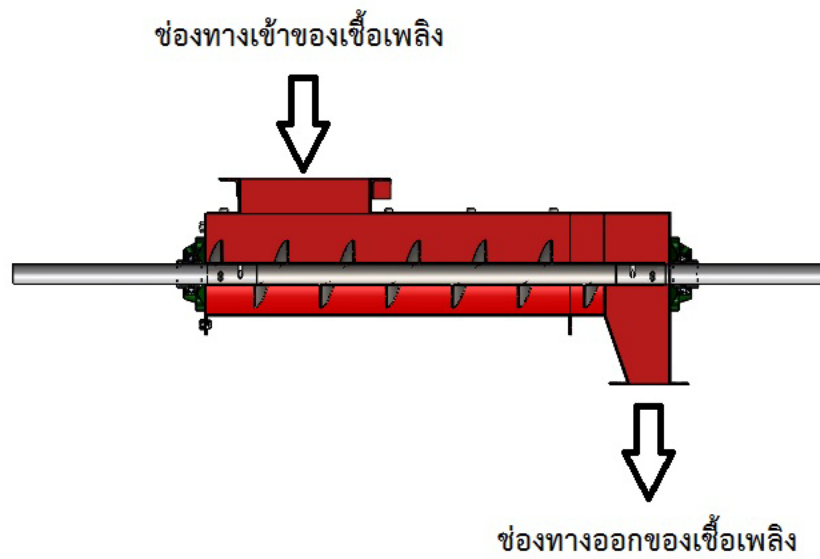


ภาพที่ 4.25 ขั้นตอนการคำนวณเพื่อออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุ

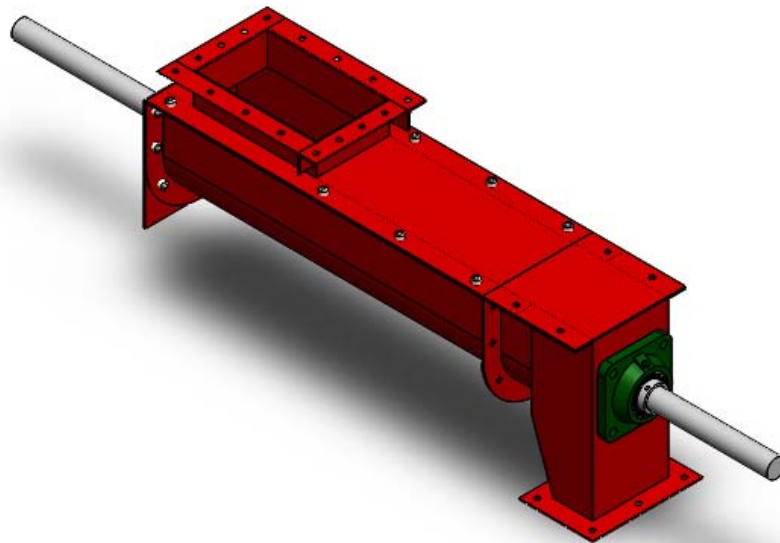
ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณเพื่อออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุ

Parameter	Symbol	Value	Unit
การคำนวณอัตราการขนถ่าย			
Fuel density	r	400.00	kg/m ³
อัตราการขนถ่ายเชิงน้ำหนัก	m _s	226.59	kg/h
ขนาด Diameter ของเกลียวสกรู	D	0.10	m
ขนาด Diameter ของแกนเพลลา	d	0.034	m
ระยะพิตช์	p	0.10	m
พื้นที่หน้าตัดของใบสกรู	A	0.007	m ²
แฟกเตอร์ความเต็มรางตัวถัง	k	0.30	
แฟกเตอร์ของระยะพิตช์	CF1	1	
แฟกเตอร์ชนิดของใบสกรู	CF2	1	
แฟกเตอร์จำนวนใบพัด	CF3	1	
ความเร็วรอบของสกรูหมุน	N	45.31	rev/min
การหากำลังขับ			
ความยาวขนถ่าย	L	1.50	m
กำลังขับสำหรับเอาชนะแรงเสียดทาน	P _f	102.65	Watt
แฟกเตอร์ใบสกรู	F _f	1	
แฟกเตอร์ใบพัด	F _p	1.29	
แฟกเตอร์วัสดุ	F _m	0.40	
กำลังขับที่ใช้ขนถ่ายวัสดุ	P _m	0.48	Watt
แฟกเตอร์กำลังขับ	F ₀	2	
ประสิทธิภาพการส่งกำลัง	h	0.50	
กำลังขับรวม	P	412.50	Watt
		0.55	Hp

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.9 จะพบว่าหากต้องทำการขนถ่ายเชื้อเพลิงด้วยอัตรา 226.56 kg/hr จะต้องใช้มอเตอร์ที่มีขนาด 0.55 Hp เป็นอย่างน้อย และความเร็วรอบของสกรูจะอยู่ที่ 45.31 rev/min ซึ่งในที่นี้เลือกใช้มอเตอร์ขนาด 1 Hp ในการขับเพลลาของสกรู แต่ทว่ามอเตอร์โดยทั่วไปจะมีความเร็วรอบ 1450 rev/min ที่ความถี่ไฟฟ้า 50 Hz ดังนั้นจึงต้องทำการทดความเร็วรอบของมอเตอร์ลงเพื่อให้ได้ความเร็วรอบที่ต้องการใช้งาน ซึ่งได้เลือกใช้มอเตอร์เกียร์อัตราทด 1:10 ให้ความเร็วรอบลดลงเหลือ 145 rev/min แล้วจึงใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบโดยละเอียดอีกครั้ง เพื่อให้ง่ายต่อการปรับลดความเร็วรอบ ตามปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตามตัวเลขความเร็วรอบที่คำนวณได้ในตารางที่ 4.9 นั้นยังเป็นเพียงค่าประมาณการเท่านั้น ซึ่งต้องทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายต่อความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายต่อไป



ภาพที่ 4.26 ภาพตัด และทิศทางการไหลของเชื้อเพลิงผ่านสกรูขนถ่าย

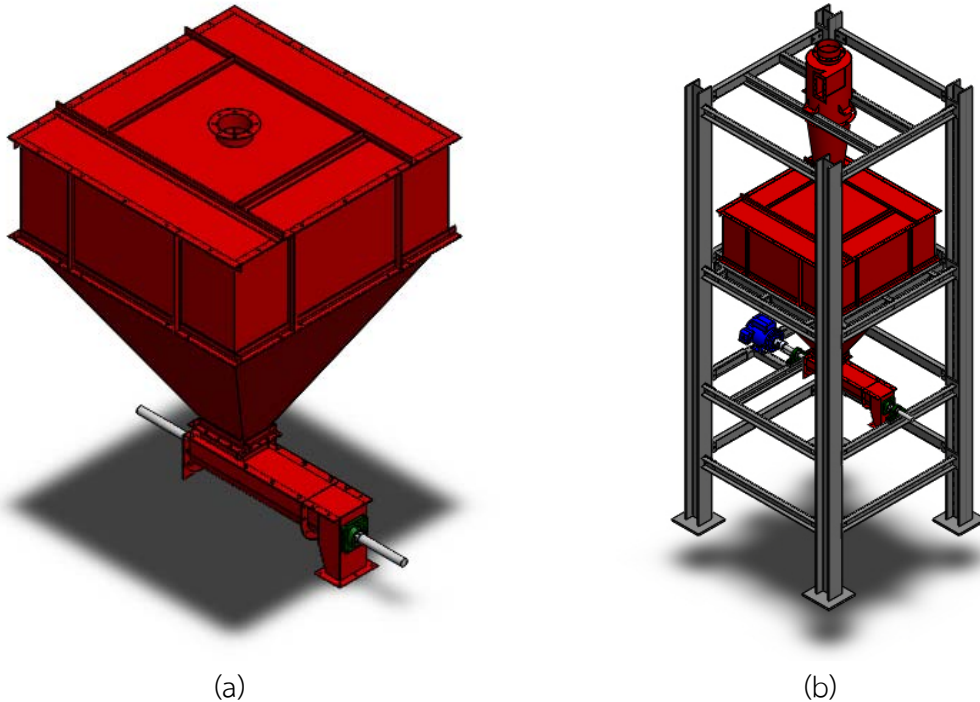


ภาพที่ 4.27 ลักษณะของสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงที่ทำการออกแบบ

ทิศทางการขนถ่ายเชื้อเพลิง ช่องทางเข้า และออกของเชื้อเพลิงผ่านสกรูขนถ่ายแสดงดังภาพที่ 4.26 โดยที่ลักษณะโดยรวมของสกรูขนถ่ายแสดงดังภาพที่ 4.27 จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่าสกรูขนถ่ายมีส่วนประกอบที่สามารถถอดประกอบได้หลายชิ้น เพื่อให้ง่ายต่อการซ่อมบำรุง ซึ่งสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้ใน [17]

4.3.3 ภาพรวมของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบถังพัก และสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ทางทีมวิจัยต้องทำการออกแบบโครงสร้างของระบบ เพื่อที่จะยึดส่วนประกอบทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน โดยได้รับความร่วมมือจากคุณธวัชชัย จำนงค์ ซึ่งเป็นหนึ่งในทีมวิจัย ในการออกแบบ และเขียนแบบโครงสร้างเพื่อรองรับระบบดังกล่าว ภาพที่ 4.28 แสดงลักษณะชุดป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ติดตั้งเข้ากับโครงสร้าง

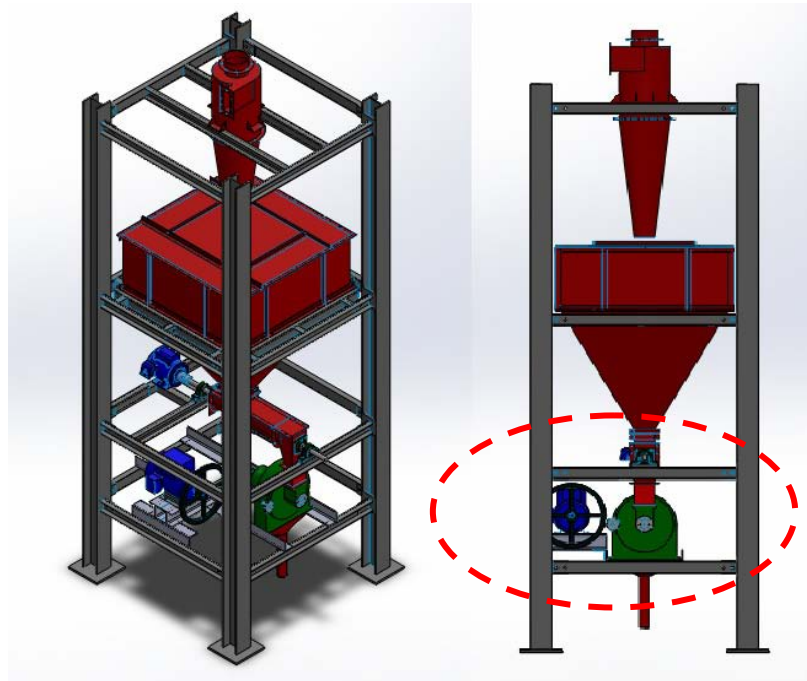


ภาพที่ 4.28 (a) การประกอบถังพักเชื้อเพลิงกับชุดสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิง (b) ลักษณะชุดป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ติดตั้งเข้ากับโครงสร้าง

4.3.4 การเลือก และติดตั้งเครื่องบดเชื้อเพลิงผง

จากเดิมแนวคิดของระบบจัดเก็บ และป้อนเชื้อเพลิงได้กำหนดไว้ว่า เมื่อเชื้อเพลิงแท่งตะเกียบ (wood pellets) ถูกบดให้เป็นผงโดยเครื่องบด แล้วจะถูกส่งไปจัดเก็บในถังเก็บเชื้อเพลิง ซึ่งการเก็บเชื้อเพลิงในลักษณะที่เป็นผงบดละเอียดนั้นยากต่อการควบคุมคุณภาพของเชื้อเพลิง เนื่องจากสภาพแวดล้อมเป็นผลให้เชื้อเพลิงมีลักษณะทางกายภาพ และคุณสมบัติที่เปลี่ยนไป รวมไปถึงการจัดเก็บในลักษณะดังกล่าวมีความเสี่ยงต่อการติดไฟได้เองของเชื้อเพลิง ด้วยเหตุผลนี้จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนการจัดเก็บเชื้อเพลิง ให้อยู่ในรูปแบบเชื้อเพลิงแท่งตะเกียบแทนรูปแบบเดิม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มกระบวนการบด โดยทำการติดตั้งเครื่องบดเชื้อเพลิงเข้าไปบริเวณใต้ถังเก็บเชื้อเพลิง ดังแสดงในภาพที่ 4.29

โดยที่ในการเลือกชนิดและประเภทของเครื่องบดนั้น ต้องคำนึงถึงประเภทของวัสดุที่จะนำมาบด ความละเอียดของผงวัสดุที่ต้องการ และกำลังในการบดให้สอดคล้องกับความต้องการในการบริโภคเชื้อเพลิงของหัวเผา ซึ่งประเภทของเครื่องบดของแท่งที่สนใจมีดังนี้



ภาพที่ 4.29 แสดงตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องบด และชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องบด

1. Hammer mill คือเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง มีลักษณะหัวบดเป็นหัวค้อนติดอยู่บนเพลลา อาศัยหลักการเหวี่ยงกระแทก ทำให้วัสดุแตกเป็นชิ้นเล็กๆ และมีตะแกรงเจาะรูเป็นตัวกรองให้เครื่องบด บดวัสดุให้ได้ขนาดตามต้องการจึงปล่อยออก

2. Ball mill คือ เครื่องบดแบบลูกบอลประกอบด้วยภาชนะปิดหลังหม้อบด หมุนอย่างช้าๆในแนวนอนภายในมีลูกบดที่เป็นบอลโลหะ อาศัยการกระแทกของลูกบดกับวัสดุที่ต้องการบด

3. Pin mill หลักการทำงานคือ วัสดุถูกใส่ลงมาจากบนสุดลงมาด้านล่าง โดยครั้งแรกจะถูกบดด้วย แรงเนื่องจากหัวบดที่หมุนอยู่ภายในจนเป็นผงละเอียด และร่วงลงด้านล่างผ่านตะแกรง ส่วนที่ไม่สามารถผ่านตะแกรงลงไปได้ต้องถูกหมุนต่อไปจนกว่าจะกลายเป็นผงและผ่านตะแกรงได้

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องบด [18]

สิ่งที่พิจารณา	ชนิดเครื่อง		
	Hammer mill	Ball mill	Pin mill
ขนาดเครื่อง	ปานกลาง	ใหญ่	ปานกลาง
ความละเอียดของการบด	หยาบ	ปานกลาง	ละเอียด

จากการเปรียบเทียบดังกล่าว จึงเลือกใช้เครื่องบดประเภท Pin mill เนื่องจากขนาดของเชื้อเพลิงผงที่ใช้ในการเผาไหม้ต้องมีขนาดที่ค่อนข้างละเอียด รวมไปถึงข้อจำกัดของพื้นที่ในการติดตั้งเครื่องบด เมื่อพิจารณาข้อมูลจำเพาะของเครื่องบดยี่ห้อ BONNY ดังแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าเครื่องบดรุ่น YPT-302 (F/S) มีกำลังการผลิต อยู่ในช่วงที่สามารถบด และป้อนเชื้อเพลิงผงเข้าสู่หัวเผาได้ในอัตรา 56.52-226.8 kg/hr ซึ่งจะผลิตกำลังความร้อนได้ 0.25 kW ถึง 1 MW

ตารางที่ 4.11 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องบด ยี่ห้อ BONNY

รุ่น MODEL	กำลังการผลิต* CAPACITY (kg/hr)	มอเตอร์ POWER (hp : kW)	รอบเครื่อง* SPEED (RPM)	สัดส่วน* DIMENSION (W × D × H : cm)
YPS-102 (F/S)	10-50	2 : 1.5	6000	95 × 55 × 130
YPT-202 (F/S)	50-150	3 : 2.2	5000	115 × 65 × 140
YPT-302 (F/S)	150-300	5 : 3.7	4000	115 × 65 × 160
YPK-401 (F/S)	300-500	10 : 7.5	3500	75 × 70 × 115 (ไม่รวมแท่น)
YPK-501 (F/S)	500-1000	20 : 15	3500	90 × 80 × 135 (ไม่รวมแท่น)

* ตัวเลขโดยประมาณ (Approximately)



ภาพที่ 4.30 แสดงเครื่องบด ยี่ห้อ BONNY รุ่น YPT-302 (F/S)



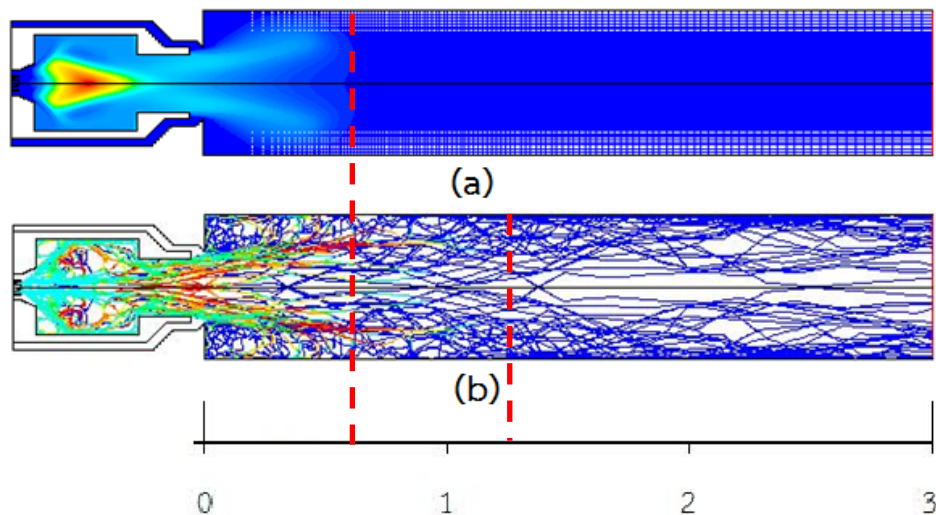
ภาพที่ 4.31 แสดงลักษณะภายในเครื่องบด ยี่ห้อ BONNY รุ่น YPT-302 (F/S)

4.4 การออกแบบห้องเผาไหม้

ห้องเผาไหม้หลักเป็นห้องที่ใช้รองรับความยาวของเปลวไฟที่พุ่งออกมาจากหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) โดยอนุภาคเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมด และหลุดออกมาจากห้องเผาไหม้ช่วยจะถูกเผาไหม้ซ้ำภายในห้องเผาไหม้หลัก สำหรับห้องเผาไหม้หลักจะต้องทำการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ มีผนังที่ทนต่อการปะทะเสียดสีของเชื้อเพลิง และต้องมีระบบระบายไถ่หนักออกจากเตา

4.4.1 การกำหนดความยาวของห้องเผาไหม้

ความยาวของห้องเผาไหม้นั้นเป็นตัวแปรหนึ่งที่ต้องทำการพิจารณาเพื่อออกแบบ เนื่องจากถ้าห้องเผาไหม้มีความยาวที่สั้นจนเกินไป ผนังส่วนท้ายจะถูกเปลวไฟ และอนุภาคของเชื้อเพลิงวิ่งปะทะ ซึ่งอาจเป็นผลให้อายุการใช้งานของปูนทนไฟสั้นลง และนอกจากนี้ห้องเผาไหม้ที่สั้นอาจส่งผลให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ยังไม่สิ้นสุดภายในเตา ซึ่งจะเป็นผลให้มีคาร์บอนคงเหลือที่ปะปนไปกับเถ้าลอยเข้าสู่ห้องบำบัด แต่หากห้องเผาไหม้มีความยาวที่มากจนเกินไปอาจส่งผลให้สิ้นเปลืองงบประมาณในการก่อสร้าง โดยที่ขนาด และความยาวของห้องเผาไหม้หลักนั้นถูกออกแบบไปพร้อมกับการจำลองเพื่อออกแบบหัวเผาในหัวข้อที่ 4.2



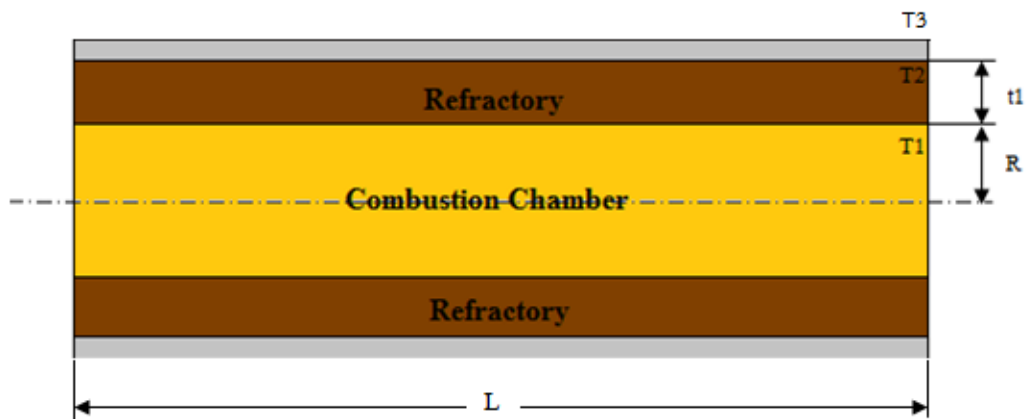
ภาพที่ 4.32 ระยะการสิ้นสุดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (a) การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหย (Mass Fraction) และ (b) เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคคาร์ระหว่าง การเผาไหม้

ในการจำลองเพื่อออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วยนั้น ได้กำหนดความยาวของห้องเผาไหม้หลักไว้ที่ 3 เมตร เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.32(a) และ(b) ซึ่งแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคคาร์ระหว่างการเผาไหม้ และการกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหยตามลำดับ จะพบว่าสารระเหยจะสิ้นสุดปฏิกิริยาการเผาไหม้อยู่ที่ระยะประมาณ 0.6 เมตรภายในห้องเผาไหม้หลัก ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 4.11 ที่ความเข้มข้นของสารระเหยจะถูกเผาไหม้จนหมดไปที่ระยะประมาณ 1.4 เมตร (หัวเผายาว 0.786 เมตร) ในขณะที่อนุภาคคาร์จะสิ้นสุดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ระยะประมาณ 1.25 เมตร เนื่องจากอนุภาคคาร์ต้องการระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่าสารระเหย

จึงต้องใช้ระยะในการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่า ดังนั้นจึงกำหนดความยาวของห้องเผาไหม้โดยอ้างอิงจากระยะในการทำปฏิกิริยาของอนุภาคคาร์ ซึ่งจะออกแบบให้ห้องเผาไหม้มีความยาวประมาณ 1.5 เมตร

4.4.2 การคำนวณความหนาของผนังห้องเผาไหม้

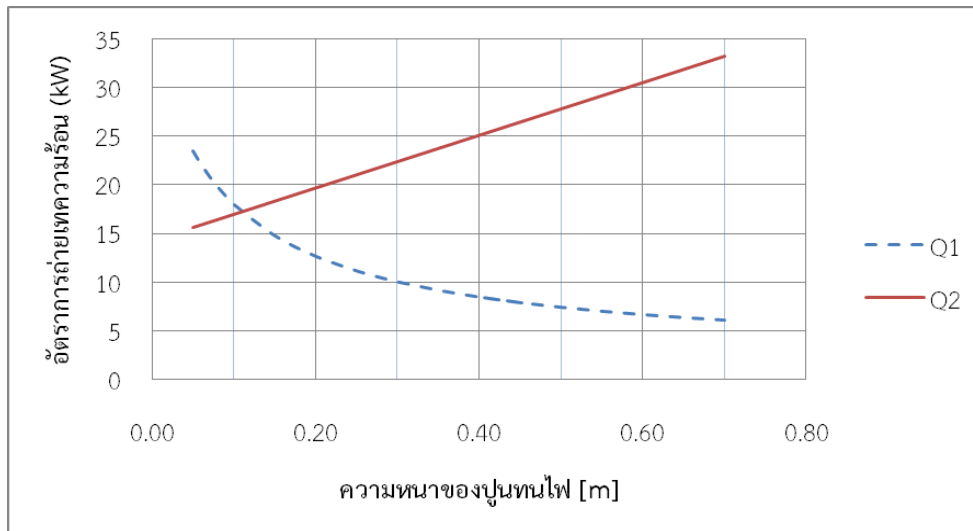
สำหรับการคำนวณความหนาของผนังห้องเผาไหม้นั้น จะใช้หลักการเดียวกันกับการคำนวณในหัวข้อที่ 4.2.6 การหาความหนาของผนังห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งขั้นตอนในการคำนวณสามารถนำวิธีการดังภาพที่ 4.19 มาประยุกต์ให้เข้ากับขอบเขตของผนังห้องเผาไหม้ที่ประกอบด้วยชั้นของปูนทนไฟ และชั้นของเซรามิก ไฟเบอร์ ดังแสดงในภาพที่ 4.33 โดยแทนค่าตัวแปรในตารางที่ 4.12 ซึ่งจะได้ผลการคำนวณดังนี้



ภาพที่ 4.33 ลักษณะขอบเขตของผนังห้องเผาไหม้

ตารางที่ 4.12 ค่าตัวแปรควบคุมที่ใช้คำนวณหาความหนาของผนังห้องเผาไหม้

Parameter	Value	Units
Chamber Radiance (R)	0.50	m
Ceramic Fiber Layer Distance	0.05	m
Chamber Length (L)	1.50	m
Thermal Conductivity of Refractory Brick @ 1200 °C	1.50	W/m.K
Thermal Conductivity of Ceramic Fiber @ 1000 °C	0.30	W/m.K
Combustion Temperature (T1)	1300.00	°C
Outside Brick Temperature (T2)	600.00	°C
Outside Stainless Ceramic Fiber Temp. (T3)	120.00	°C

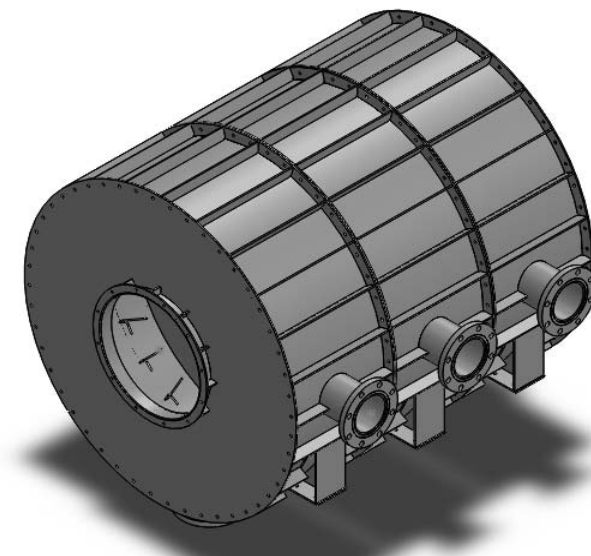


ภาพที่ 4.34 ผลการคำนวณหาความหนาของผนังปูนทนไฟของห้องเผาไหม้

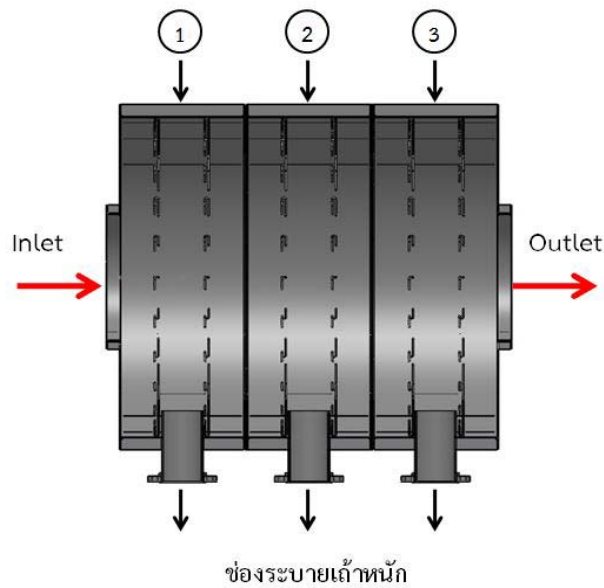
พิจารณาภาพที่ 4.34 ผลการคำนวณหาความหนาของผนังห้องเผาไหม้ จะพบว่าความหนาของปูนทนไฟที่ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังปูนทนไฟ (Q_1) เท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังชั้นใยหิน (Q_2) จะมีค่าประมาณ 0.27 m ซึ่งเป็นจุดที่กราฟของทั้งสองสมการมาตัดกันนั่นเอง

4.4.3 รายละเอียดแบบสั้งผลิตสำหรับห้องเผาไหม้

เมื่อทำการคำนวณเพื่อออกแบบห้องเผาไหม้ จนได้ผลการคำนวณ และขนาดต่างๆที่เป็นที่น่าพอใจแล้ว ลำดับต่อไปจะเข้าสู่ขั้นตอนการเขียนแบบสั้งผลิต และสั้งขึ้นรูปห้องเผาไหม้ โดยได้รับความอนุเคราะห์จากคุณธวัชชัย จ่านงค์ ซึ่งเป็นหนึ่งในทีมวิจัย ในการออกแบบรูปร่าง และเขียนแบบห้องเผาไหม้ รวมไปถึงการออกแบบโครงสร้างของห้องเผาไหม้ด้วย ลักษณะของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล แสดงดังภาพที่ 4.35

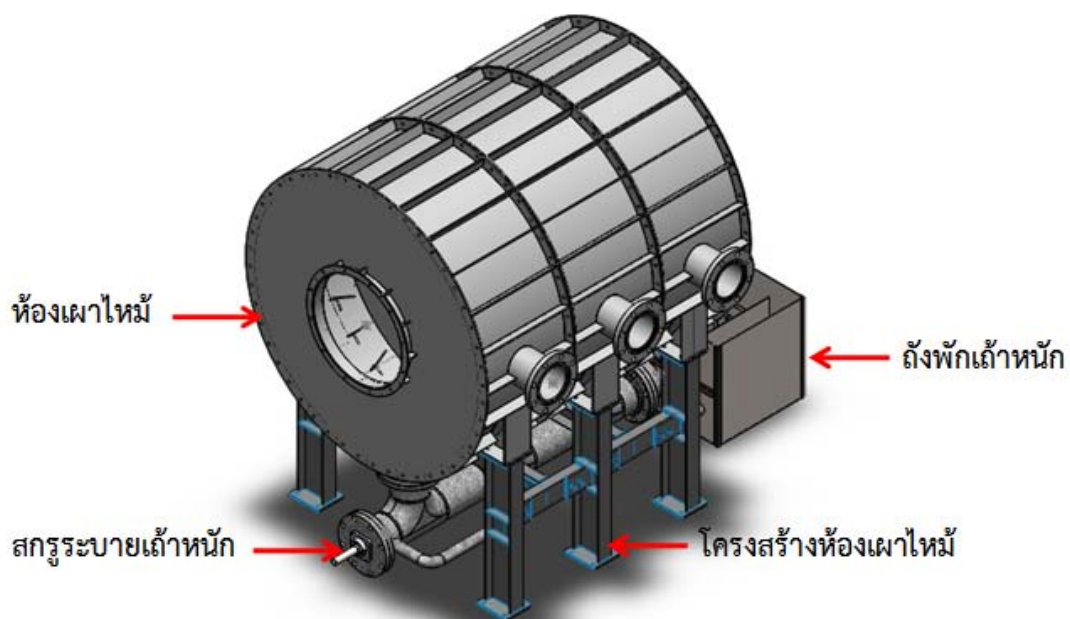


ภาพที่ 4.35 ลักษณะของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล



ภาพที่ 4.36 ภาพตัดแสดงลักษณะภายในของเปลือกห้องเผาไหม้

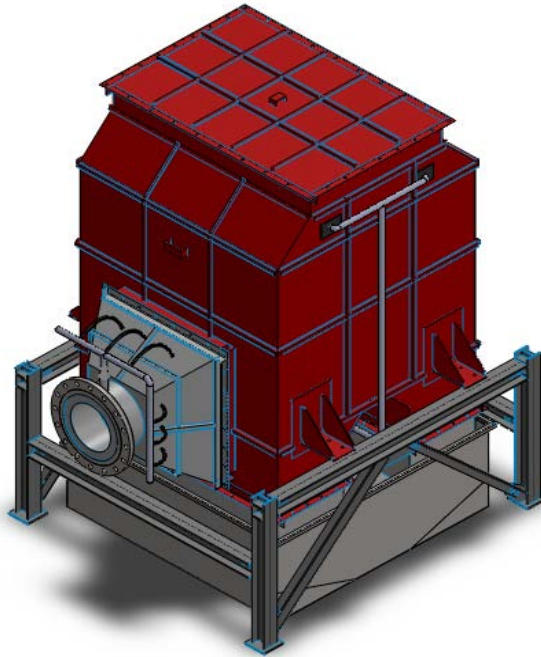
เพื่อให้ง่ายต่อการขึ้นรูปขึ้นงาน การถอดประกอบ การหล่อปูนทนไฟ รวมไปถึงการขยายความยาวของห้องเผาไหม้ในอนาคต จึงได้ออกแบบให้ห้องเผาไหม้สามารถถอดประกอบได้เป็นท่อนๆ ซึ่งแต่ละท่อนจะมีลักษณะที่มีความสมมาตรกัน เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.36 แสดงลักษณะภายในของเปลือกห้องเผาไหม้ จะพบว่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ท่อน ท่อนละ 0.5 เมตร ด้านล่างของห้องเผาไหม้จะมีช่องสำหรับระบายเก้าหนักเข้าสู่สกรูระบายเก้าหนัก ในขณะที่ภายในของเปลือกห้องเผาไหม้จะทำการเชื่อมหนาแน่นเตยไว้เพื่อใช้เป็นตัวยึดปูนทนไฟ ซึ่งแบบสั้งผลิตโดยละเอียดของห้องเผาไหม้ และสกรูระบายเก้าหนักสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [17]



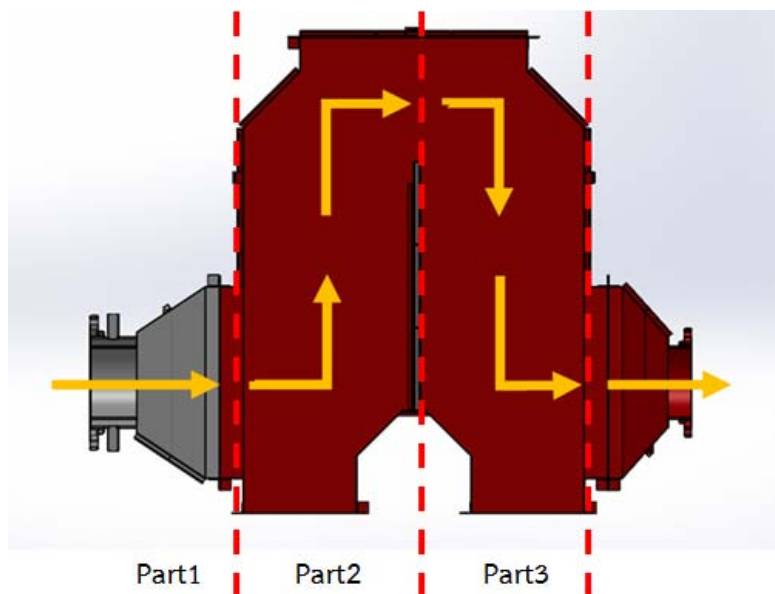
ภาพที่ 4.37 ส่วนประกอบของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

4.5 การออกแบบระบบบำบัดไอเสีย

สำหรับระบบนี้จะออกแบบโดยทำการรวมระบบลดอุณหภูมิไอเสีย นั่นคือ evaporative cooling และระบบกำจัดฝุ่น wet scrubber เข้าไว้ด้วยกัน เนื่องจากข้อจำกัดในด้านงบประมาณ และพื้นที่ในการติดตั้งเครื่องจักร ซึ่งแนวคิดในการออกแบบนั้นจะต้องออกแบบช่องทางการไหลของแก๊สไอเสีย ให้แก๊สมีระยะเวลาที่อยู่ในห้องบำบัดนานที่สุด เพื่อให้ไอเสียสัมผัสกับละอองน้ำให้มากที่สุด ซึ่งลักษณะระบบบำบัดไอเสียแสดงดังภาพที่ 4.38 และทิศทางการไหลของแก๊สร้อนภายในห้องบำบัดแสดงดังภาพที่ 4.39



ภาพที่ 4.38 ลักษณะระบบบำบัดไอเสีย

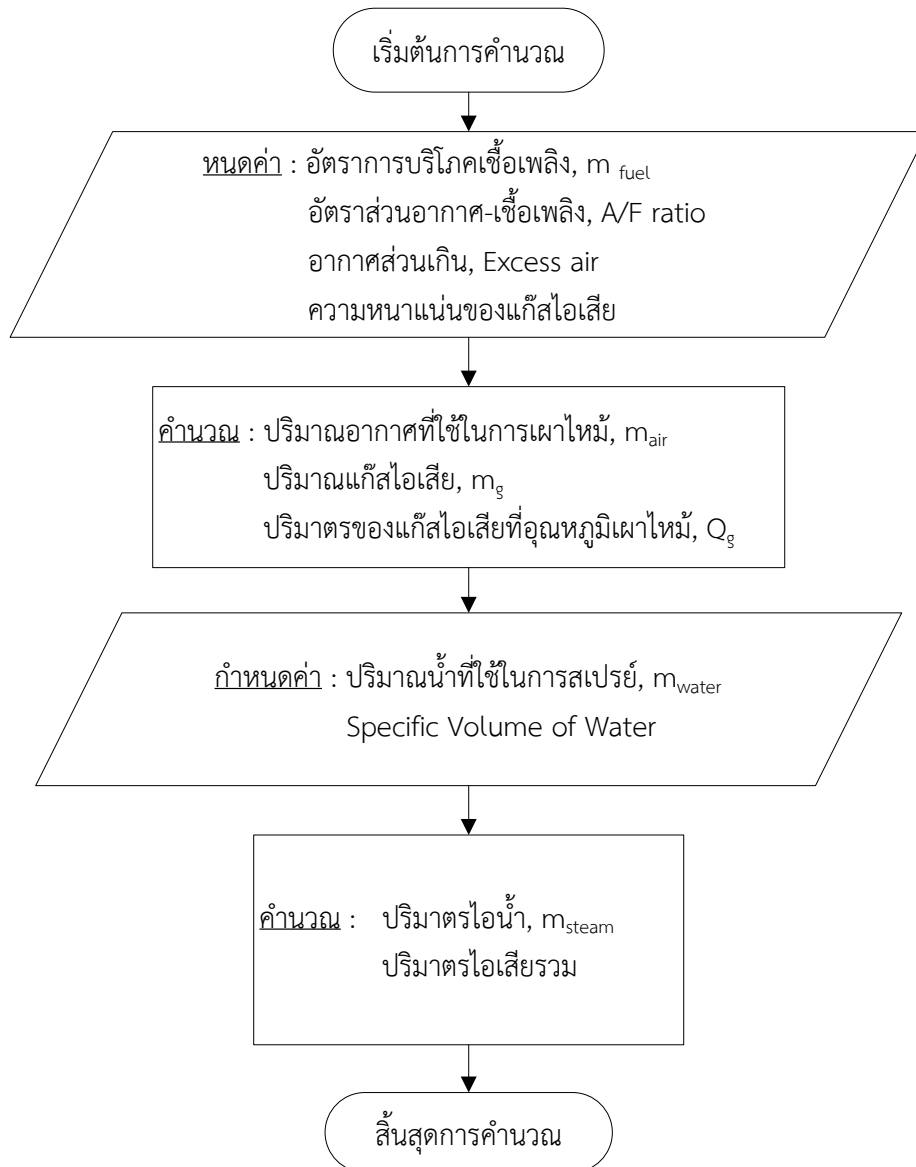


ภาพที่ 4.39 ทิศทางการไหลของแก๊สร้อนภายในห้องบำบัดไอเสีย

แบบส่งผลิตโดยรายละเอียดของระบบบำบัดไอเสีย นั้นแสดงใน [17] ซึ่งนอกเหนือจากการออกแบบถังบำบัดไอเสียแล้ว จำเป็นต้องทำการติดตั้งหัวฉีด ระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้สำหรับบำบัดไอเสีย รวมไปถึงการคำนวณเพื่อเลือกซื้อพัดลมดูดไอเสียให้กับระบบ เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.39 สามารถสังเกตทิศทางการไหลของแก๊สร้อนภายในห้องบำบัดไอเสียได้จากสัญลักษณ์เส้นสีเหลือง ซึ่งภายในห้องบำบัดไอเสียจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 (part 1) เป็นส่วนของการระเหยน้ำเพื่อลดอุณหภูมิของแก๊สไอเสีย น้ำจะถูกสเปรย์ในลักษณะที่เป็นม่านตั้งฉากกับทิศทางการไหลของแก๊สไอเสีย ความร้อนจะถูกถ่ายเทสู่น้ำเพื่อใช้ในการระเหยเป็นไอน้ำ อุณหภูมิของแก๊สไอเสียจึงลดลง ในขณะที่ส่วนที่ 2 และ 3 (part 2 และ 3) จะเป็นบริเวณของการดักจับเถ้าลอย โดยจะทำการสเปรย์น้ำในลักษณะที่ตั้งฉากกับการไหลของแก๊สไอเสีย เมื่อเถ้าลอยวิ่งปะทะกับม่านน้ำจะส่งผลให้น้ำหนักของเถ้ามากขึ้น และจะตกลงสู่บ่อพักน้ำบำบัด ซึ่งในการพิจารณาเลือกหัวฉีดสำหรับสเปรย์ม่านน้ำนั้น ต้องพิจารณาหัวฉีดที่สามารถสเปรย์ม่านน้ำให้ครอบคลุมพื้นที่หน้าตัดของถังบำบัดไอเสีย

เมื่อปล่อยลูกม่านน้ำตกให้ตกลงสู่บ่อพักน้ำบำบัดแล้ว น้ำบำบัดจะถูกดูดไปยังบ่อตกตะกอน เพื่อทำการตกตะกอนของเล้า โดยจะทำการหมุนเวียนน้ำกลับมาสเปรย์ในถังบำบัดอีกครั้ง ซึ่งถังบำบัดโอเสียจะถูกกำหนดให้ใช้ปั้มน้ำจำนวน 2 เครื่อง ปั้มน้ำเครื่องแรกจะดูดน้ำสะอาดจากถังสำรองน้ำเพื่อใช้ในการสเปรย์เข้าสู่ส่วนที่ 1 ของห้องบำบัด เนื่องจากบริเวณดังกล่าวน้ำจะถูกทำให้ระเหยเป็นไอ หากใช้น้ำที่มีตะกอนเจือปน เมื่อน้ำระเหยเป็นไอล้วนจะส่งผลให้ปริมาณอนุภาคในแก๊สโอเสียเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอัตราการไหลของน้ำผ่านปั้มเครื่องแรกจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของแก๊สโอเสีย ในส่วนของปั้มตัวที่สองจะดูดน้ำจากบ่อตกตะกอนเพื่อนำมาสเปรย์ในส่วนที่ 2 และ 3 ของห้องบำบัดโอเสียต่อไป

ดังนั้นในการกำหนดปริมาตรของบ่อตกตะกอนจึงคำนึงถึงปริมาณการใช้น้ำของหัวฉีดในส่วนที่ 2 และ 3 โดยในที่นี้ได้กำหนดให้บ่อตกตะกอนมีปริมาตร 2.5 m^3 และอัตราการไหลของน้ำผ่านปั้มน้ำตัวที่สองจะอยู่ที่ $2 \text{ m}^3/\text{hr}$



ภาพที่ 4.41 ขั้นตอนในการคำนวณหาปริมาตรของแก๊สไอเสีย

ในการเลือกซื้อพัดลมสำหรับดูดไอเสีย (ID fan) นั้น จำเป็นต้องทราบค่าปริมาตรของไอเสียก่อน โดยการคำนวณหาปริมาตรของไอน้ำนั้นแสดงดังภาพที่ 4.41 ซึ่งปริมาตรรวมที่ได้จากการคำนวณนั้น จะเป็นปริมาตรที่รวมการระเหยของไอน้ำภายในถังบำบัดไอเสียเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ตารางที่ 4.13 แสดงผลการคำนวณหาปริมาตรรวมของไอเสีย

ตารางที่ 4.13 แสดงการคำนวณปริมาณไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้

Parameter	Value	Unit
Burner capacity	1000	kW
	859845.23	kcal/hr
คำนวณปริมาณแก๊สไอเสีย		
Fuel heating value	3970	kcal/kg
Fuel consumption	216.59	kg/hr
A/F ratio	5.60	
Excess air	30	%
Air for combustion	1576.74	kg/hr
Total flue gas @ 25 °C	1793.33	kg/hr
Flue gas density	1.32	kg/Nm ³
Flue gas volume flow rate @ 25 °C	1358.58	Nm ³ /hr
Flue gas density	200	°C
Flue gas volume flow rate @ 800 °C	2156.41	m ³ /hr
	1269.21	cfm
ปริมาณน้ำที่ฉีด	1000	kg/hr
Specific volume	2.17	m ³ /kg
ปริมาตรไอน้ำ	2172.49	m ³ /hr
	1278.60	cfm
ปริมาตรของไอเสียรวม	4328.90	m ³ /hr
	2547.90	cfm

บทที่ 5

อุปกรณ์ เจียนไซ และวิธีการทดลอง

สำหรับบทนี้จะนำเสนอถึงการขึ้นรูปชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง จากแบบสั่งผลิตที่ผ่านการคำนวณออกแบบในบทก่อนหน้านี้ นอกจากนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้ในการบันทึกข้อมูล และเครื่องมือวัดต่างๆ รวมทั้งวิธีการทดลองเพื่อทดสอบหาสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิง และหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) เป็นต้น

5.1 การขึ้นรูปชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

หลังจากที่ทำการคำนวณ และออกแบบชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง จนได้ขนาดที่ต้องการสำหรับเขียนแบบสั่งผลิตแล้ว หัวข้อนี้จะนำเสนอถึงผลลัพธ์ของการส่งแบบสั่งผลิตให้กับผู้รับเหมาเพื่อทำการขึ้นรูปชุดอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ตัวอย่างเช่น หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล ถังพักเชื้อเพลิง ระบบสกรูขนถ่าย และห้องเผาไหม้ เป็นต้น

5.1.1 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber)

เพื่อให้ง่ายต่อการขึ้นรูป การประกอบ และการซ่อมบำรุง หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลจึงถูกออกแบบให้ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักๆ 9 ชิ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.17



ภาพที่ 5.1 แสดงชิ้นส่วนหลักของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย

ภาพที่ 5.1 แสดงชิ้นส่วนหลักของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย หลังจากผ่านการขึ้นรูปเป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยรายละเอียดของแต่ละชิ้นส่วนแสดงในหัวข้อที่ 4.2.5 ซึ่งก่อนที่จะทำการประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน จะต้องทำการหล่อปูนทนไฟในชิ้นส่วนที่ต้องสัมผัสกับเปลวไฟ นั่นคือชิ้นส่วนหมายเลข 2 และหมายเลข 4 ซึ่งรายละเอียดในการหล่อปูนทนไฟ และขั้นตอนการประกอบหัวเผาสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [19] เมื่อทำการประกอบทุกชิ้นส่วนเข้าด้วยกันจะได้หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง ดังแสดงในภาพที่ 5.2 และภาพที่ 5.3



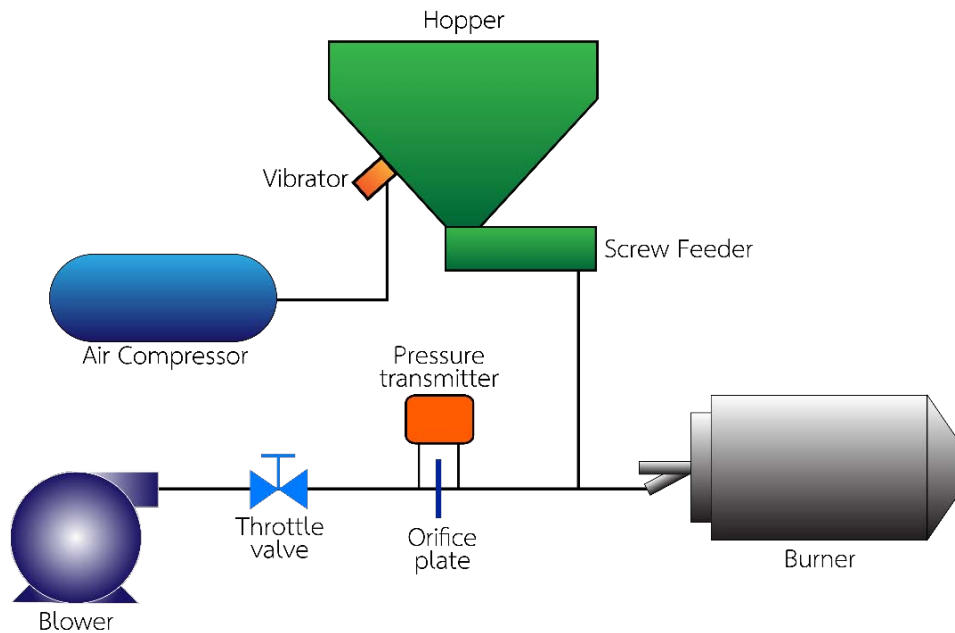
ภาพที่ 5.2 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (ด้านหน้า)



ภาพที่ 5.3 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (ด้านหลัง)

5.1.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง

สำหรับชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ระบบป้อนเชื้อเพลิงถือเป็นระบบหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก และเป็นระบบที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ย่อยหลายส่วน ซึ่งองค์ประกอบย่อยของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง แสดงดังภาพที่ 5.4



ภาพที่ 5.4 แผนภาพองค์ประกอบย่อยของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง [18]



ภาพที่ 5.5 ลักษณะถังพักเชื้อเพลิงชีวมวลผง (hopper) และสกรูลำเลียงที่ติดตั้งเข้ากับโครงสร้าง



ภาพที่ 5.6 ระบบลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผง

สำหรับถังพักเชื้อเพลิง และสกรูลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผง ที่แสดงในภาพที่ 5.5 และ 5.6 นั้นถูกสร้างขึ้นตามแบบสั้งผลิตที่ได้คำนวณไว้ในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งถึงดังกล่าวมีความจุประมาณ 0.5 m^3 สามารถสำรองเชื้อเพลิงชีวมวลผงสำหรับการทดสอบการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 1 MW ได้นานสูงสุด 45 นาที นอกจากนี้บริเวณผนังด้านข้างของถังพักเชื้อเพลิงได้ถูกติดตั้งอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนด้วยลมชนิดเคาะ หรือทุบโดยตรง (Impact Hammer) โดยใช้ลมจากเครื่องอัดอากาศที่ความดัน 4 bar_g เพื่อให้การไหลของเชื้อเพลิงภายในถังพักเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และลดการติดค้างของเชื้อเพลิงในถังพัก ซึ่งลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับถังพักเชื้อเพลิง แสดงดังภาพที่ 5.7



ภาพที่ 5.7 แสดงอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนด้วยลมที่เลือกใช้

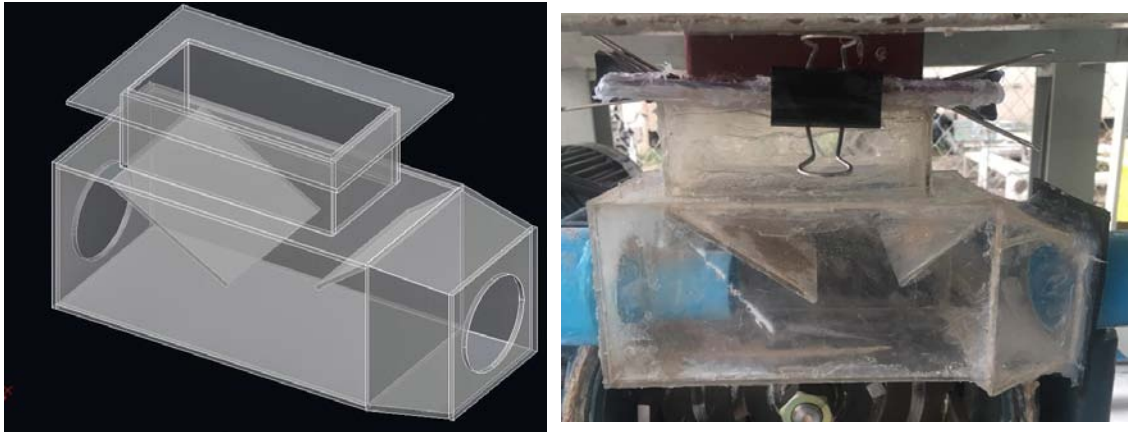


ภาพที่ 5.8 เครื่องอัดอากาศสำหรับอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือน



ภาพที่ 5.9 โบลเวอร์ และวาล์วปรับอัตราการไหลอากาศส่วนที่หนึ่ง (primary air)

เชื้อเพลิงชีวมวลผงจะถูกควบคุมอัตราการขนถ่ายด้วยความเร็วรอบของสกรูขนถ่าย แล้วจะถูกส่งเข้าสู่หัวเผาด้วยวิธีการขนถ่ายด้วยลม ภาพที่ 5.9 แสดงลักษณะของโบลเวอร์ (blower) สำหรับอากาศส่วนที่หนึ่ง ซึ่งเป็นอากาศที่ทำหน้าที่นำเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และลักษณะของวาล์วปีกผีเสื้อที่ใช้สำหรับควบคุมอัตราการไหลของอากาศเพื่อให้เกิดความเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ในยานต่างๆ เมื่อเชื้อเพลิงถูกลำเลียงผ่านสกรูลำเลียงแล้วจะตกลงสู่กล่องผสม (mixing box) ซึ่งเป็นกล่องที่มีน้ำผสมอากาศ และเชื้อเพลิงผง เชื้อเพลิงที่ตกลงมาจากปากของสกรูขนถ่ายจะถูอากาศเหนี่ยวนำให้พุ่งเข้าสู่ห้องเผาไหม้ โดยลักษณะของกล่องผสมแสดงดังภาพที่ 5.10



ภาพที่ 5.10 อุปกรณ์สำหรับลำเลียงเชื้อเพลิง และอากาศเข้าสู่หัวเผา [18]

นอกเหนือจากอุปกรณ์ที่แสดงในภาพที่ 5.4 แล้ว ระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผงยังประกอบไปด้วยอุปกรณ์อีกหนึ่งอย่างคือ เครื่องบดเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งชุดเครื่องบดนี้จะถูกติดตั้งเข้ากับโครงสร้างของถังพักเชื้อเพลิง และจะถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ตามที่ได้ระบุไว้ในข้อมูลจำเพาะของเครื่องบด ดังแสดงในตารางที่ 4.11 หากเครื่องบดที่ได้มาจากผู้ผลิตสามารถที่จะบดเชื้อเพลิงได้ในอัตราการผลิตที่ระบุไว้ในข้อมูลจำเพาะ ระบบป้อนเชื้อเพลิงจะสามารถเปลี่ยนการจัดเก็บเชื้อเพลิงให้อยู่ในรูปแบบเม็ด (pellet) ก่อนจะเข้าเครื่องบด แล้วส่งเข้าห้องเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่องที่กำลังความร้อน 1 MW แต่อย่างไรก็ตามควรจะต้องมีการทดสอบอัตราการบดที่แท้จริงที่ได้จากการบดเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง เพื่อประเมินถึงศักยภาพของเครื่องบดด้วย ซึ่งการทดสอบขีดความสามารถของเครื่องบดจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 5.3.1.3



ภาพที่ 5.11 เครื่องบดเชื้อเพลิงที่ถูกติดตั้งกับระบบป้อนเชื้อเพลิง

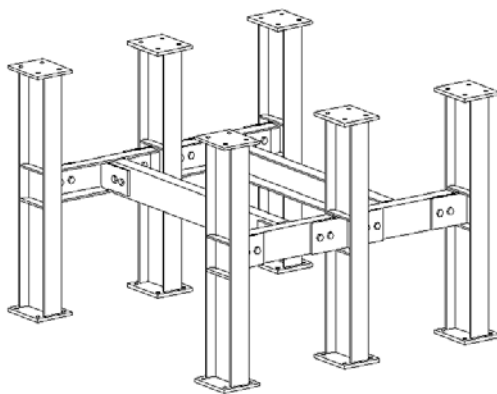
5.1.3 ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

สำหรับอุปกรณ์ชิ้นที่สามของชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง คือ ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลนั้นจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ 4 ส่วนได้แก่ ห้องเผาไหม้ โครงสร้างห้องเผาไหม้ ถังพักถ่านหิน และชุดสกรูระบายถ่านหิน เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 4.36



ภาพที่ 5.12 ลักษณะของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

หลังจากที่ทำการขึ้นรูปเปลือกของห้องเผาไหม้ตามแบบสั่งผลิตเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อไปจะเป็นกระบวนการทำสี หล่อผนังปูนทนไฟ และการประกอบแต่ละท่อนเข้าด้วยกัน ซึ่งนอกเหนือจากการขึ้นรูป และประกอบห้องเผาไหม้แล้วจะต้องทำการขึ้นรูปโครงสร้าง และระบบสกรูระบายไอน้ำ ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [20]



ภาพที่ 5.13 โครงสร้างห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง [20]



ภาพที่ 5.14 สกรูระบายไอน้ำ และถังพักไอน้ำ



ภาพที่ 5.15 มอเตอร์สกรูระบายไถ่หนัก

5.1.4 ระบบบำบัดไอเสีย

สำหรับแนวคิดในการออกแบบระบบบำบัดไอเสียนั้นถูกกล่าวไว้ในหัวข้อ 4.5 ซึ่งหัวใจของระบบนั้นอยู่ที่ห้องบำบัดซึ่งเป็นการรวมระบบลดอุณหภูมิไอเสีย (evaporative cooling) และระบบกำจัดฝุ่นแบบเปียก (wet scrubber) เข้าไว้ด้วยกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.37 สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการส่งแบบสิ่งผลิตดังแสดงในภาคผนวก ก5 ให้กับผู้รับเหมาเพื่อทำการขึ้นรูปขึ้นส่วน ภาพที่ 5.16 แสดงห้องบำบัดไอเสียที่ทำการขึ้นรูป และประกอบจนแล้วเสร็จ และนอกเหนือจากถังบำบัดทางที่มวิจัยยังต้องทำการติดตั้งหัวฉีดน้ำ ระบบหมุนเวียนน้ำ รวมไปถึงการติดตั้งพัดลมดูดแก๊สไอเสีย และปล่องไอเสีย เป็นต้น ซึ่งลักษณะในการจัดวางตำแหน่งของระบบบำบัดไอเสียแสดงดังภาพที่ 4.39



ภาพที่ 5.16 ถังบำบัดไอเสีย (evaporative scrubber)



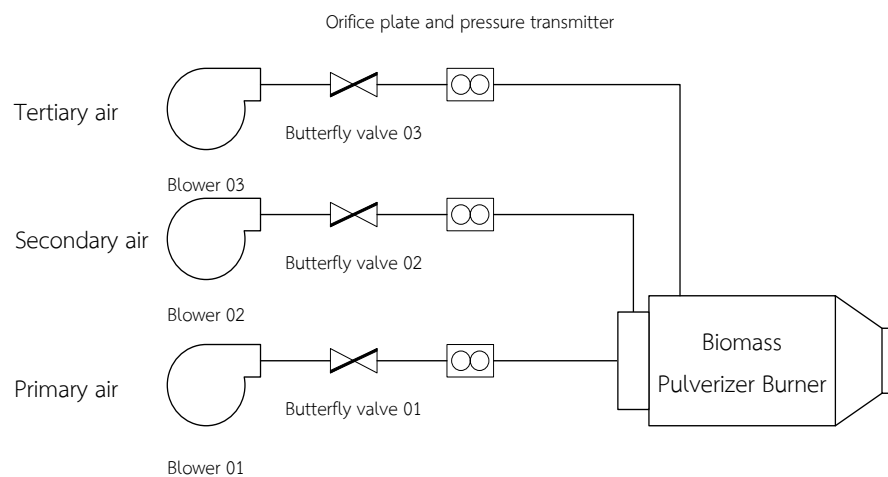
ภาพที่ 5.17 ลักษณะของม่านน้ำสำหรับดับเพลิง



ภาพที่ 5.18 บ่อตกตะกอน และพัดลมดูดไอเสีย

5.2 อุปกรณ์วัด ควบคุม และบันทึกผล

5.2.1 ระบบป้อนอากาศ



ภาพที่ 5.19 ระบบป้อนอากาศสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง

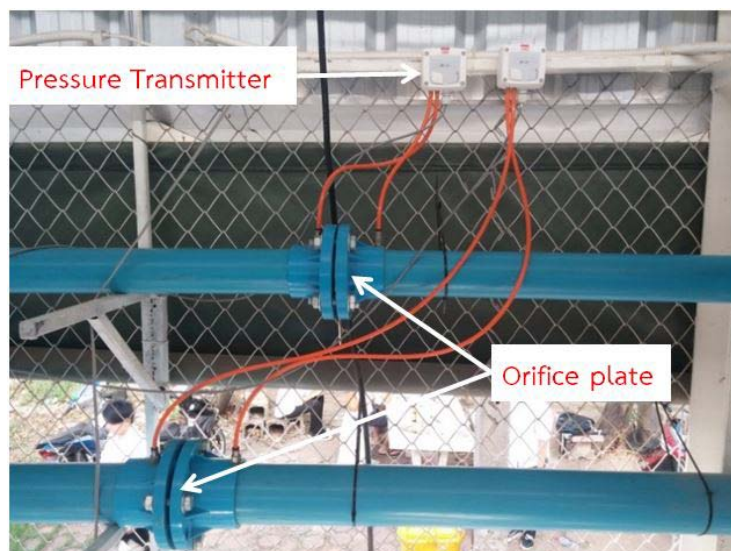
ระบบป้อนอากาศสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง ถูกออกแบบให้อากาศแบ่งออกเป็นสามส่วนตามหน้าที่ของการทำงาน ได้แก่

1. อากาศส่วนที่หนึ่ง (primary air) ใช้สำหรับจุดติดหัวเผา และออกแบบไว้ให้อากาศที่นำเชื้อเพลิงชีวมวลผงเข้าสู่ห้องเผาไหม้
2. อากาศส่วนที่สอง (secondary air) เป็นอากาศหลักที่ใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งจะออกแบบให้อากาศไหลผ่านใบพัด (swirl blades) ก่อนเข้าสู่หัวเผา ส่งผลให้อากาศส่วนนี้เข้าสู่ห้องเผาไหม้ในลักษณะที่มีการหมุนควง
3. อากาศส่วนที่สาม (tertiary air) ทำหน้าที่หล่อเย็นห้องเผาไหม้ช่วย และเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber)

เมื่อพิจารณาภาพที่ 5.19 จะพบว่าอุปกรณ์การควบคุมอากาศประกอบไปด้วย พัดลม (blower) สามเครื่องสำหรับอากาศทั้งสามส่วน วาล์วปีกผีเสื้อ (butterfly valve) orifice plate และ pressure transmitter เป็นต้น



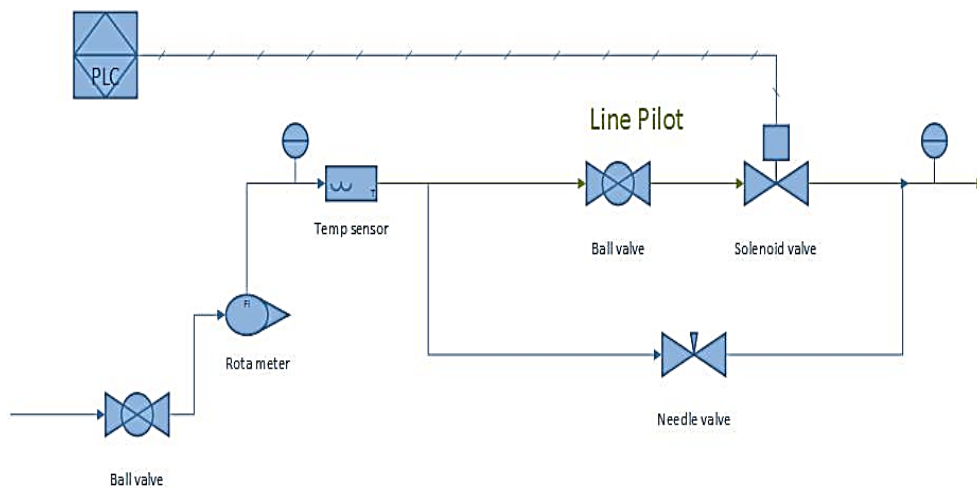
ภาพที่ 5.20 วาล์วปีกผีเสื้อ (butterfly valve) หลังการติดตั้ง



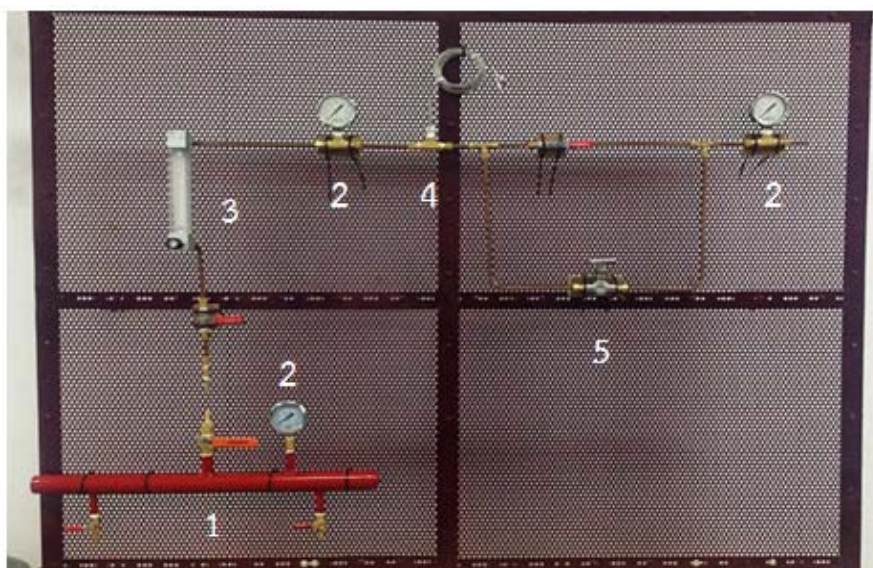
ภาพที่ 5.21 ลักษณะการติดตั้ง Orifice plate และ Pressure Transmitter

5.2.2 ระบบทางเดินแก๊ส LPG

ทางเดินท่อแก๊ส LPG ทำขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุมการจุดระเบิดของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง เมื่อพิจารณาภาพที่ 5.22 แก๊สจะถูกส่งผ่านจากตัว Header โดยมี Ball valve เป็นตัวควบคุมเพื่อเปิด-ปิดแก๊สให้ผ่านไปยัง Rota meter เพื่อวัดอัตราการไหลของแก๊ส และวัดแรงดันโดย Pressure gauge ก่อนเข้าอุปกรณ์ Temperature sensor จากนั้นก่อนเข้าหัวเผาจะมีท่อทางเดินแก๊ส 2 ทาง คือ ทางที่ใช้ Solenoid valve ซึ่งจะใช้ไฟฟ้าในการสั่งการเปิดปิดวาล์ว และทางที่ใช้ Needle valve ในการเปิด-ปิดแก๊สซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยมือ ข้อดีของการมีทางเดินแก๊ส 2 ทางคือเพื่อสะดวกในการซ่อมบำรุง เช่น หาก Solenoid valve มีปัญหาไม่ว่าจะเนื่องจากไฟฟ้าดับ หรือตัว Solenoid valve เสียก็ยังสามารถใช้ Needle valve ในการทำงานต่อไปได้ และก่อนเข้าหัวเผาได้ติดตั้ง Pressure gauge เพื่อวัดแรงดันก่อนเข้าหัวเผาอีกครั้งเพื่อดูได้ว่าความดันของแก๊สก่อนที่จะเข้าหัวเผาเป็นไปตามที่ต้องการ



ภาพที่ 5.22 แผนภาพการทำงานของทางเดินท่อแก๊สก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง



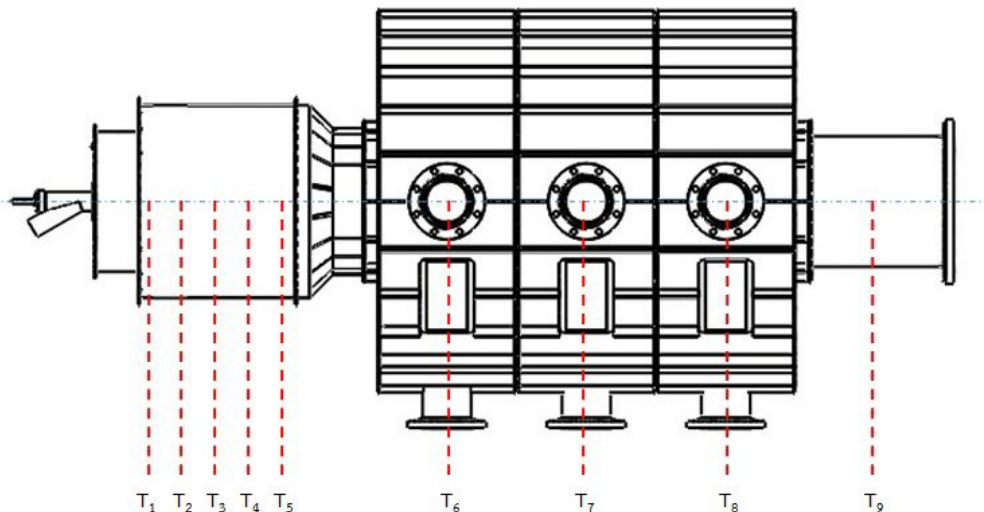
ภาพที่ 5.23 แผงควบคุมแก๊ส LPG ก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมแก๊ส LPG.

1. Header สามารถรับแรงดันได้สูงสุด 10 bars
2. Pressure gauge ยี่ห้อ Nuovafima 2.5 ช่วงการทำงาน 0-4 bars
3. Rota meter ยี่ห้อ Nitto รุ่น K200 Model 2013 ช่วงการทำงาน 1-10 l/min
4. Temperature sensor type K
5. Needle valve รุ่น SINV3-F-4N-SS

5.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

ในการบันทึกค่าอุณหภูมิจะเก็บบันทึกทั้งหมด 10 ตำแหน่งตามระยะแนวแกนของชุดทดสอบการเผาไหม้ดังแสดงในภาพที่ 5.24 โดยแบ่งเป็นที่บริเวณหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลจำนวน 5 ตำแหน่ง บริเวณห้องเผาไหม้ 3 ตำแหน่ง บริเวณทางช่องทางออกแก๊สไอเสีย และปล่องไอเสียบริเวณละ 1 ตำแหน่ง ซึ่งในการตรวจวัดทำโดยใช้ thermocouple type K เชื่อมต่อกับหน่วยแสดงผล YOKOGAWA รุ่น XL100 และเก็บบันทึกผลเมื่อการเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงที่



ภาพที่ 5.24 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิ



ภาพที่ 5.25 thermocouple type K และหน่วยแสดงผล YOKOGAWA XL 100

5.2.4 อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สไอเสีย

ตำแหน่งที่จะทำการตรวจวัดแก๊สไอเสียคือบริเวณช่องทางออกของแก๊สไอเสีย ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งวัดอุณหภูมิ T_9 ดังแสดงในภาพที่ 5.24 โดยจะทำการตรวจวัด และบันทึกผลเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนหลังการเผาไหม้ ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ และสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดได้แก่เครื่องวัดแก๊ส Testo รุ่น 350 XL แต่เนื่องด้วยตำแหน่งที่จะทำการวัดไอเสียดังกล่าว เป็นบริเวณที่แก๊สไอเสียมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง ($900-1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) จึงต้องทำการดัดแก๊สไอเสียออกมาวัดภายนอก ดังนั้นจึงได้เพิ่มอุปกรณ์ช่วยในการวัดค่า ได้แก่ หลอดพัก และลดอุณหภูมิไอเสีย และปั๊มสุญญากาศดังแสดงในภาพที่ 5.27



ภาพที่ 5.26 เครื่องวัดแก๊สไอเสีย Testo รุ่น 350 XL



(a)



(b)

ภาพที่ 5.27 อุปกรณ์ช่วยในการวัดค่าแก๊สไอเสีย (a) หลอดพัก และลดอุณหภูมิไอเสีย และ (b) ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)

5.2.5 อุปกรณ์วัด และควบคุมอื่นๆ

5.2.5.1 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

สำหรับชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงนั้น ระบบที่มีความจำเป็นต้องทำการควบคุมความเร็วรอบจะประกอบไปด้วยสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิง และพัดลมดูดแก๊สไอเสีย ซึ่งทั้งสองระบบจะถูกควบคุมความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ที่แสดงดังภาพที่ 5.28 และ 5.29 ตามลำดับ



ภาพที่ 5.28 อินเวอร์เตอร์ (inverter) ยี่ห้อ Schneider รุ่น ATV312



ภาพที่ 5.29 อินเวอร์เตอร์ (inverter) ยี่ห้อ Winner รุ่น WIN-V63

5.2.5.2 เครื่องวัดความเร็วรอบ



ภาพที่ 5.30 เครื่องวัดความเร็วรอบ (tachometer) ยี่ห้อ Digicon รุ่น DT-245P

สำหรับย่านการทำงาน (ranges) ค่าความแม่นยำ (accuracy) และค่าความละเอียด (resolution) ของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองสามารถตรวจสอบได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าความละเอียด และความแม่นยำของเครื่องมือวัด

รายการ	ย่านการทำงาน (Ranges)	ค่าความแม่นยำ (Accuracy)	ค่าความละเอียด (Resolution)
Pressure gauge ยี่ห้อ Nuova fima	0-4 bar	$\pm 1.6 \%$	0.1 bar
Rota meter ยี่ห้อ Nitto รุ่น K200	0-10 l/min	$\pm 5.0 \%$	0.2 l/min
Data logger YOKOGAWA รุ่น XL100 + thermocouple type K	-	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	0.1°C
Difference pressure transmitter ยี่ห้อ KIMO รุ่น CP 112	0-10 mbar	$\pm 1.5 \%$	0.01 mbar
Difference pressure transmitter ยี่ห้อ KIMO รุ่น CP 115	0-2000 mbar	$\pm 1.5 \%$	1 mbar
Gas analyzer Testo 350 XL	O ₂ ; 0-25 Vol.%	$\pm 0.8 \%$	0.1 Vol.%
	CO ; 0-10000 ppm	$\pm 5.0 \%$	1 ppm
	NO ; 0-3000 ppm	$\pm 5.0 \%$	1 ppm
Inverter ยี่ห้อ Schneider รุ่น ATV312	0-50 Hz.	$\pm 0.2 \%$	0.1 Hz.
Inverter ยี่ห้อ Winner รุ่น WIN-V63	0-50 Hz.	$\pm 5.0 \%$	0.01 Hz.
Tachometer ยี่ห้อ Digicon DT-245P	5-99,999 RPM	$\pm 0.05 \%$	0.1 RPM

5.2.6 ชุดทดลอง Sieve analysis

สำหรับชุดทดสอบ sieve analysis จะประกอบไปด้วยเครื่องเขย่าคัดขนาด จาน และถาดรองตะแกรงเบอร์#40, #50, #60, #100, #140 และ#200 ตามลำดับ



ภาพที่ 5.31 ชุดทดสอบ sieve analysis

5.3 เงื่อนไข และวิธีการทดลอง

สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงเงื่อนไข และขั้นตอนในการทดสอบสมรรถนะของชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ซึ่งจะเน้นที่การทดสอบสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล และหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) เป็นหลัก ในขณะที่ระบบบำบัดไอเสียนั้นถูกออกแบบ และสร้างขึ้นมาเพื่อให้สามารถใช้งานได้เป็นหลัก โดยที่ยังมิได้มีการทดสอบถึงสมรรถนะการทำงาน

5.3.1 การทดสอบสมรรถนะระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง

ระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผงถือเป็นระบบหนึ่งที่มีความสำคัญต่อชุดทดสอบการเผาไหม้เป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นระบบที่ส่งผลต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของหัวเผาโดยตรง ดังนั้นระบบป้อนเชื้อเพลิงที่ดีต้องสามารถลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนอัตราการป้อนได้อย่างรวดเร็ว สำหรับการทดสอบสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นจะเริ่มต้นตั้งแต่การหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของสกรูต่อการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ อัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิง และอัตราการผลิตที่แท้จริงของเครื่องบด เป็นต้น

5.3.1.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายกับ

ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (RPM - Hz)

เนื่องจากความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายนั้น จะถูกควบคุมด้วยการปรับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์กำลังโดยใช้อินเวอร์เตอร์ (inverter) ถึงแม้ว่าจะทราบอัตราทด และความเร็วรอบสูงสุดของมอเตอร์เกียร์ แต่เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการทดลองในลำดับถัดไป จึงต้องมีการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าว

เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (RPM)

ตัวแปรตาม : ความเร็วรอบของสกรูขนถ่าย

ตัวแปรควบคุม : ตำแหน่งในการวัดความเร็วรอบ

วิธีการทดลอง

1. เปิด switch มอเตอร์ของสกรูขนถ่าย และอินเวอร์เตอร์
2. ใช้อินเวอร์เตอร์ (inverter) ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สกรู โดยเริ่มต้นที่ 1 Hz
3. ใช้เครื่องวัดความเร็วรอบ (tachometer) วัดความเร็วรอบที่แกนเพลลา ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยบันทึกค่าลงในตาราง
4. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 3-5 โดยปรับเพิ่มความถี่ของกระแสไฟฟ้าขึ้นทีละ 5 Hz จนถึง 50 Hz

5.3.1.2 การทดลองหาอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงชีวมวล

เมื่อพิจารณาสมการที่ 3.4 การคำนวณอัตราการการขนถ่ายตามทฤษฎีจะพบว่ามีสองตัวแปรที่ส่งผลต่ออัตราการการขนถ่าย คือความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (ρ_b) และแฟกเตอร์ความเต็มรางของ วัสดุ (k) นั่นคือถึงแม้ว่าจะใช้ระบบสกรูขนถ่ายชุดเดียวกัน แต่เมื่อทำการ

เปลี่ยนเชื้อเพลิงอัตราการขนถ่ายก็จะเปลี่ยนไป ดังนั้นหัวข้อนี้จึงเป็นการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่าย (kg/s) กับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (Hz) ของเชื้อเพลิงสามชนิดที่มีความแตกต่างกัน ได้แก่ ไร่หยาบ ขี้เลื่อยบดละเอียด และขี้เลื่อยอัดแท่ง ซึ่งจะนำไปสู่การสร้างความสัมพันธ์ หรือความเชื่อมโยงระหว่างชุดสกรูลำเลียงที่ได้ทำการออกแบบ กับเชื้อเพลิงแต่ละประเภท

เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : ชนิดของเชื้อเพลิง และความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (RPM)

ตัวแปรตาม : น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ถูกป้อนสู่ภาชนะบรรจุ (kg)

ตัวแปรควบคุม : เวลาในการขนถ่ายเชื้อเพลิงที่ 1 นาที

วิธีการทดลอง

1. บรรจุเชื้อเพลิงลงในถังพักเชื้อเพลิง (hopper)
2. ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สกรู ซึ่งการทดลองจะเริ่มต้นที่ 1 Hz
3. นำภาชนะที่ผ่านการชั่งน้ำหนักเริ่มต้น มารองรับเชื้อเพลิงบริเวณทางออกของรางสกรู
4. เปิด switch มอเตอร์ของสกรูขนถ่าย และอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้เชื้อเพลิงถูกถ่ายออกจากภาชนะรองรับที่เตรียมไว้ โดยจับเวลา 1 นาที แล้วปิดการจ่ายกระแสที่อินเวอร์เตอร์
5. นำเชื้อเพลิงที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และบันทึกค่าลงในตารางบันทึกผลการทดลอง
6. ทดลองซ้ำตามข้อที่ 2-5 โดยปรับเพิ่มความถี่ของกระแสไฟฟ้าขึ้นทีละ 1 Hz ถึง 5 Hz
7. เมื่อทำการทดลองครบแล้ว ให้ทำความสะอาดสกรูขนถ่าย และทำการเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิง แล้วทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-6

5.3.1.3 การทดสอบกำลังการผลิตของเครื่องบด

เครื่องบดที่ทำการติดตั้งเข้ากับระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผงนั้น เป็นเครื่องบดสำเร็จภาพที่ได้รับมาจากทางผู้ผลิต และเมื่อพิจารณาข้อมูลจำเพาะของเครื่องบดที่แสดงในตารางที่ 4.11 จะพบว่ากำลังการผลิตที่ได้ระบุไว้ในตารางนั้นถูกระบุหมายเหตุไว้ว่าเป็นค่าโดยประมาณ ซึ่งทางผู้ผลิตไม่ได้ระบุไว้ว่าเป็นค่าที่มาจาก การทดสอบบดวัสดุชนิดใด หรือใช้รูตะแกรงขนาดเท่าไร ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบกำลังการผลิตที่เครื่องบดสามารถทำได้จริงกับเชื้อเพลิงที่จะนำมาทดสอบนั้นคือขี้เลื่อยอัดแท่ง เพื่อเป็นการประเมินถึงสมรรถนะของเครื่องบด และแนวทางในการทดลองในลำดับถัดไปด้วย

เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : ขนาดของรูตะแกรงเครื่องบด 0.5 mm 1.0 mm และ 1.5 mm. ตามลำดับ

ตัวแปรตาม : อัตราการบดเชื้อเพลิง (kg/min)

ตัวแปรควบคุม : เวลาในการขนถ่ายเชื้อเพลิงที่ 1 นาที

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากขี้เลื่อยไม้ยางพารา

วิธีการทดลอง

1. บรรจุขี้เลื่อยอัดแท่ง (pellet) ลงในถังพักเชื้อเพลิง (hopper)
2. ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สกรู โดยเริ่มต้นที่ 0.5 Hz

3. เปิด switch มอเตอร์ของสกรูขนถ่าย และอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้เชื้อเพลิงถูกป้อนไปยังเครื่องบด แล้วปิดการจ่ายกระแสที่อินเวอร์เตอร์
4. นำภาชนะมารองรับเชื้อเพลิงที่ออกจากเครื่องบด ที่ใช้ตะแกรงที่มีรูขนาด 0.5 mm โดยจับเวลา 1 นาที แล้วปิดการจ่ายกระแสที่อินเวอร์เตอร์
5. นำเชื้อเพลิงที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย และบันทึกค่าลงในตาราง
6. ทดลองซ้ำตามข้อที่ 2-5 โดยปรับเพิ่มความถี่ของกระแสไฟฟ้าขึ้นทีละ 0.5 จนถึง 5 Hz
7. ทดลองซ้ำตามข้อที่ 2-6 โดยเปลี่ยนตะแกรงเป็นขนาดรู 1 mm. และ 1.5 mm. ตามลำดับ

5.3.1.4 การทดสอบขนาดของเชื้อเพลิงที่ผ่านการบด

หลักจากที่ได้ทราบกำลังการผลิตสูงสุดที่เครื่องบดสามารถทำได้ และได้ทำการทดสอบการเผาไหม้ไปแล้วในเบื้องต้น หัวข้อนี้จะเป็นการนำตัวอย่างของเชื้อเพลิงที่บดผ่านตะแกรงที่มีขนาด 0.5 mm. มาทำการวิเคราะห์แยกขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิง ซึ่งค่าสัดส่วนของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงที่ได้มานั้นจะถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลต่อไป

เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : ความละเอียดของตะแกรง

ตัวแปรตาม : น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ตกค้างบนตะแกรง (kg)

ตัวแปรควบคุม : น้ำหนักตัวอย่างเชื้อเพลิงเริ่มต้น 100 กรัม

เวลาในการลอง 10 นาที

ชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่บดผ่านรูตะแกรงขนาด 0.5 mm.

วิธีการทดลอง

1. ทำความสะอาดตะแกรง แล้วทำการชั่งน้ำหนักของตะแกรงแต่ละเบอร์บันทึกค่า
2. นำตะแกรงมาเรียงซ้อนกัน โดยให้ตะแกรงขนาดใหญ่อยู่ชั้นบนสุด ซึ่งสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ #40, #50, #60, #100, #140 และ #200
3. นำเชื้อเพลิงตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 100 กรัม ใส่ไปในตะแกรงชั้นบนสุด ปิดฝาให้แน่น แล้วนำเข้าเครื่องเขย่าใช้เวลาในการเขย่าประมาณ 10 นาที แล้วนำตะแกรงแต่ละอันไปชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนักตะแกรงรวมกับเชื้อเพลิงที่ค้างอยู่บนตะแกรง จดบันทึกค่า
4. ทำความสะอาดตะแกรงให้เรียบร้อยก่อนที่จะทำการทดลองครั้งต่อไป
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2-4

5.3.2 การทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

ในการทดสอบการเผาไหม้เพื่อหาสมรรถนะ และย่านการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมานั้น ต้องทำการทดสอบเป็นลำดับขั้น ได้แก่ การทดสอบสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิง การทดสอบขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีความเหมาะสม และการทดสอบอิทธิพลขององศาใบบิด (swirler blade) เป็นต้น เพื่อนำผลสรุปจากการทดลองนั้นๆไปใช้เป็นตัวแปรควบคุมของการทดลองในขั้นถัดไป ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ถูกนำมาใช้ในการทดสอบคือขี้เลื่อยไม้ยางพารา

5.3.2.1 วิธีการจุดระเบิด และการอุ่นหัวเผา

ก่อนที่จะทำการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง จะต้องทำการอุ่นหัวเผาและห้องเผาไหม้ เพื่อให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) สูงขึ้นจนกระทั่งเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ป้อนเข้าสู่หัวเผาสามารถเกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเองได้ สำหรับการจุด และการอุ่นหัวเผาในเบื้องต้นจะใช้เชื้อเพลิงแก๊ส LPG ซึ่งการทดสอบปริมาณ LPG ที่เหมาะสมกับการอุ่นหัวเผาสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [26] แต่เนื่องจากห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลมีขนาดใหญ่หากใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงในการอุ่นเพียงอย่างเดียว จะต้องใช้แก๊ส LPG ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นในช่วงการอุ่นหัวเผาจะต้องให้เชื้อเพลิงชีวมวลผงร่วมด้วย ซึ่งการอุ่นตามีลำดับขั้นตอนดังนี้

การจุดหัวเผา

1. เปิดวาล์วอากาศส่วนที่สองที่ 30% อัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ 0.057 kg/s
2. เปิดวาล์วแก๊ส ปรับค่าอัตราการไหลแก๊สโดยใช้ needle valve ที่ติดตั้งอยู่บนแผงควบคุมแก๊ส LPG ดังแสดงในภาพที่ 5.23 โดยปรับอัตราการไหลที่ 1 L/min
3. ทำการเปิดอุปกรณ์ขยายแรงดันไฟฟ้า เพื่อให้เกิดประกายไฟบริเวณเคียวจุด



ภาพที่ 5.32 อุปกรณ์ขยายแรงดันไฟฟ้าสำหรับจุดประกายไฟ

การอุ่นหัวเผา

เมื่อทำการจุดไฟที่หัวเผาแก๊ส LPG เป็นที่เรียบร้อยแล้วจะทำการเพิ่มอัตราการไหลของ LPG เป็น 5 L/min ทำการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องจนอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว อุณหภูมิสูงสุดบริเวณแกนกลางห้องเผาไหม้ช่วยประมาณ 400 - 500 °C ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นจะทำการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง อากาศส่วนที่หนึ่ง และอากาศส่วนที่สามเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอุ่นหัวเผาจะเทียบเท่าการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 300 kW ทำการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องจนอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว อุณหภูมิสูงสุดบริเวณแกนกลางห้องเผาไหม้ช่วยจะอยู่ที่ประมาณ 800 °C จึงหยุดปล่อยแก๊ส LPG

5.3.2.2 การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงต่อพฤติกรรมการเผาไหม้

สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการนำเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีขนาดของอนุภาคแตกต่างกันป้อนสู่หัวเผา และทดสอบความสามารถในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เพื่อหาขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งการทดลองนี้จะมีลำดับขั้นตอนเหมือนขั้นตอนการอุ่นหัวเผา เพียงแต่จะทำการปรับเปลี่ยนขนาดของอนุภาค และลดกำลังความร้อนในการเผาไหม้ลงเหลือ 100 kW

เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : ขนาดของเชื้อเพลิงที่ผ่านรูตะแกรงเครื่องบด 0.5, 1.0 และ 1.5 mm.

ตัวแปรตาม : ลักษณะของเปลวไฟจากการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิง

ตัวแปรควบคุม : แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขในการทดลอง (ตัวแปรควบคุม) เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิง

อัตราการไหลของแก๊ส LPG, L/min	5.00
อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล, kg/min (Hz)	0.38 (0.30)
อากาศส่วนที่หนึ่ง (primary air)	ใช้อากาศที่ก่อกำเนิดโดยเครื่องบด
อากาศส่วนที่สอง (secondary air), kg/s (%valve)	0.055 (30)
พัดลมดูดอากาศ, Hz	30

วิธีการทดลอง

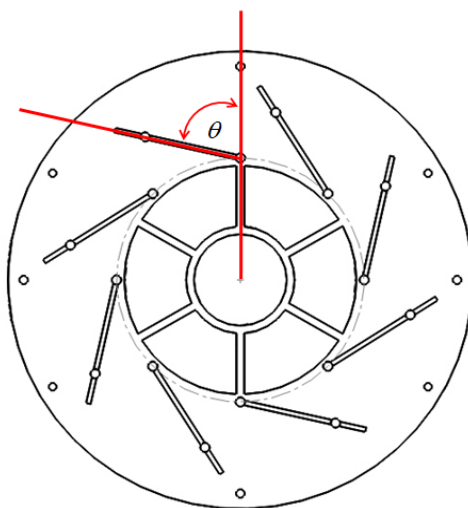
1. บรรจุเชื้อเพลิงไม้ยางพาราอัดแท่งลงในถังพักเชื้อเพลิง (hopper)
2. ตรวจสอบตะแกรงของเครื่องบด โดยเริ่มทดลองที่ขนาดรูตะแกรงเท่ากับ 1.5 mm.
3. ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สกรูขนถ่ายตามเงื่อนไขการทดลอง
4. เปิด switch พัดลมอากาศส่วนที่สอง และปรับวาล์วตามเงื่อนไขการทดลอง
5. ทำการจุดไฟ และอุ่นหัวเผาด้วยแก๊ส LPG
6. เปิด switch มอเตอร์ของสกรูขนถ่าย และอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้เชื้อเพลิงถูกลำเลียงไปยังเครื่องบด และลมจากเครื่องบดจะเป็นตัวส่งเชื้อเพลิงผงเข้าสู่หัวเผา
7. บันทึกภาพลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้
8. ทดลองซ้ำตามข้อที่ 2-7 โดยเปลี่ยนใช้ขนาดรูตะแกรง 1 mm. และ 0.5 mm. ตามลำดับ

5.3.2.3 การศึกษาอิทธิพลขององศาใบพัดต่อพฤติกรรมการเผาไหม้

สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบสมรรถนะของใบพัดในการสร้างกระแสอากาศที่มีลักษณะหมุนควงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย โดยจะทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย ที่องศาของใบพัดที่แตกต่างกันสามระดับคือมุม 100 องศา 85 องศา และ 60 องศา ตามลำดับ ซึ่งเป็นย่านการปรับองศาที่ใบพัดจะสามารถทำได้ ลักษณะในการอ้างอิงมุมแสดงดังภาพที่ 5.33 โดยจะทำการทดสอบการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 300 kW เงื่อนไขการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

ตัวแปรควบคุม	200 kW	300 kW	400 kW	500 kW
Biomass Fuel, kg/s (Hz)	0.0127 (1)	0.0189 (1.45)	0.0251 (1.95)	0.0314 (2.40)
Primary Air, kg/s (%valve1)	0.0089 (25)	0.0134 (31)	0.0178 (36)	0.0223 (43)
Secondary Air, kg/s (%valve2)	0.0580 (30)	0.0869 (38)	0.1159 (46)	0.1449 (54)
Tertiary Air, kg/s (%valve3)	0.0223 (25)	0.0334 (30)	0.0446 (40)	0.0557 (50)
**Operate at 30 Hz ID Fan				
**Excess air = 15 %				



ภาพที่ 5.33 ลักษณะการอ้างอิงมุมของใบพัด

เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : องศาของใบพัด (swirl blades) ที่ 100, 85 และ 60 องศา ตามลำดับ

ตัวแปรตาม : ลักษณะของเปลวไฟ และพฤติกรรมการเผาไหม้ภายในหัวเผา

ตัวแปรควบคุม : ชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่บดผ่านรูตะแกรงขนาด 0.5 mm.

อัตราการป้อนอากาศ และเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ที่ 300 kW. ดังแสดงในตารางที่ 5.3

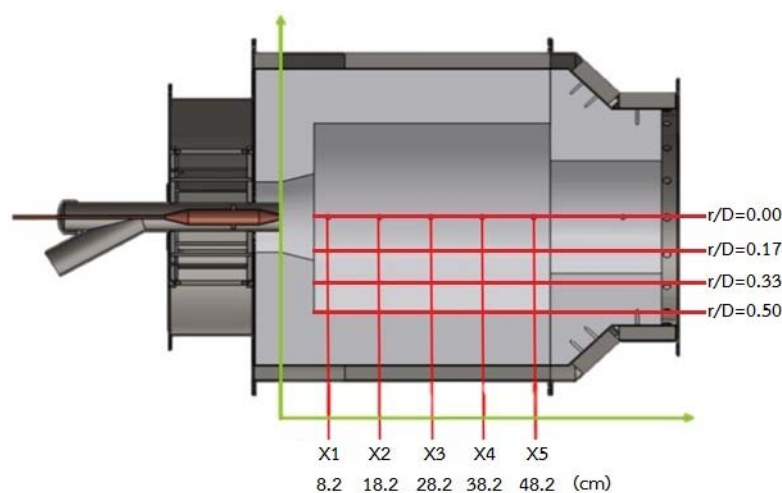
วิธีการทดลอง

1. บรรจุเชื้อเพลิงชีวมวลลงในถังพักเชื้อเพลิง (hopper)
2. ปรับองศาของใบพัดไปที่ตำแหน่งมุม 100 องศา.
3. ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สกรูขนถ่ายตามเงื่อนไขการทดลอง
4. เปิด switch พัดลมอากาศส่วนที่สอง และปรับวาล์วตามเงื่อนไขการทดลอง

5. ทำการจุดไฟ และอุ่นหัวเผาด้วยแก๊ส LPG
6. เปิด switch มอเตอร์ของสกรูขนถ่าย และอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้เชื้อเพลิงถูกลำเลียงไปยังกล่องผสม และลมจากเครื่องบดจะเป็นตัวส่งเชื้อเพลิงผงเข้าสู่หัวเผา
7. เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถเผาไหม้ด้วยตัวเองได้อย่างต่อเนื่อง ให้ทำการปิดแก๊ส LPG เมื่ออุณหภูมิของการเผาไหม้คงที่ ให้ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ และบันทึกภาพลักษณะของเปลวไฟภายในห้องเผาไหม้ช่วย
8. ทำการบันทึกค่าไอเสีย
9. ทดลองซ้ำตามข้อที่ 2-8 โดยเปลี่ยนองศาของใบพัดไปที่ตำแหน่งมุม 85 องศา. และ 60 องศา ตามลำดับ

5.3.2.4 การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วย

การทดลองนี้จะเป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย ด้วยการบันทึกค่าของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยจำนวน 20 ตำแหน่ง ประกอบกับการบันทึกภาพลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิแสดงดังภาพที่ 5.34 โดยจะทำการทดสอบการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 400 kW เปรียบเทียบกับที่ 500 kW เงื่อนไขการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.3



ภาพที่ 5.34 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย

เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : อัตราการป้อนเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ที่ 400 และ 500 kW

ตัวแปรตาม : การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหัวเผา ($^{\circ}\text{C}$)

ตัวแปรควบคุม : ชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่บดผ่านรูตะแกรงขนาด 0.5 mm.

มุมองศาใบพัดที่ 100 องศา

สัดส่วนของอากาศ อากาศส่วนที่ 1 10%

อากาศส่วนที่ 2 65%

อากาศส่วนที่ 3 25%

อากาศส่วนเกินที่ 15 % ดังแสดงในตารางที่ 5.3

วิธีการทดลอง

1. บรรจุเชื้อเพลิงชีวมวลลงในถังพักเชื้อเพลิง (hopper)
2. ปรับองศาของใบพัดไปที่ตำแหน่งมุม 100 องศา.
3. ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สกรูขนถ่ายตามเงื่อนไขการทดลอง
4. เปิด switch พัดลมอากาศส่วนที่สอง และปรับวาล์วตามเงื่อนไขการทดลอง
5. ทำการจุดไฟ และอุ่นหัวเผาด้วยแก๊ส LPG
6. เปิด switch มอเตอร์ของสกรูขนถ่าย และอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้เชื้อเพลิงถูกลำเลียงไปยังกล่องผสม และลมจากเครื่องบดจะเป็นตัวส่งเชื้อเพลิงผงเข้าสู่หัวเผา
7. เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถเผาไหม้ด้วยตัวเองได้อย่างต่อเนื่อง ให้ทำการปิดแก๊ส LPG เมื่ออุณหภูมิของการเผาไหม้คงที่ ให้ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิทั้ง 20 ตำแหน่ง และบันทึกภาพลักษณะของเปลวไฟภายในห้องเผาไหม้ช่วย
8. ทำการบันทึกค่าไอเสีย
9. ทดลองซ้ำตามข้อที่ 2-8 โดยเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ และเชื้อเพลิงไปที่ 500 kW

5.3.2.5 การศึกษายานการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล

ในการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลนั้น จะถูกจำกัดการทดสอบด้วยปัจจัยในหลายๆ ด้าน เช่น ความสามารถในการบดเชื้อเพลิงของเครื่องบดขนาดของโบลเวอร์ (blower) และขีดความสามารถของชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้ที่ทำการออกแบบขึ้น เป็นต้น ด้วยข้อจำกัดดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วง 200 kW ถึง 500 kW โดยใช้องศาใบพัดที่ 100 องศา และใช้เงื่อนไขการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5.3

เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : อัตราการป้อนอากาศ และเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตัวแปรตาม : การกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน ($^{\circ}\text{C}$)

ตัวแปรควบคุม : ชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่บดผ่านรูตะแกรงขนาด 0.5 mm.

มุมมองศาใบพัดที่ 100 องศา

สัดส่วนของอากาศ อากาศส่วนที่ 1 10%

อากาศส่วนที่ 2 65%

อากาศส่วนที่ 3 25%

อากาศส่วนเกินที่ 15 % ดังแสดงในตารางที่ 5.3

สำหรับวิธีการทดลองนั้นจะดำเนินการเหมือนในหัวข้อที่ผ่านมา แต่จะทำการบันทึกค่าอุณหภูมิเฉพาะบริเวณแกนกลางของหัวเผา และห้องเผาไหม้ทั้งหมด 10 ตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งในการบันทึกอุณหภูมิแสดงดังภาพที่ 5.24

บทที่ 6

ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง

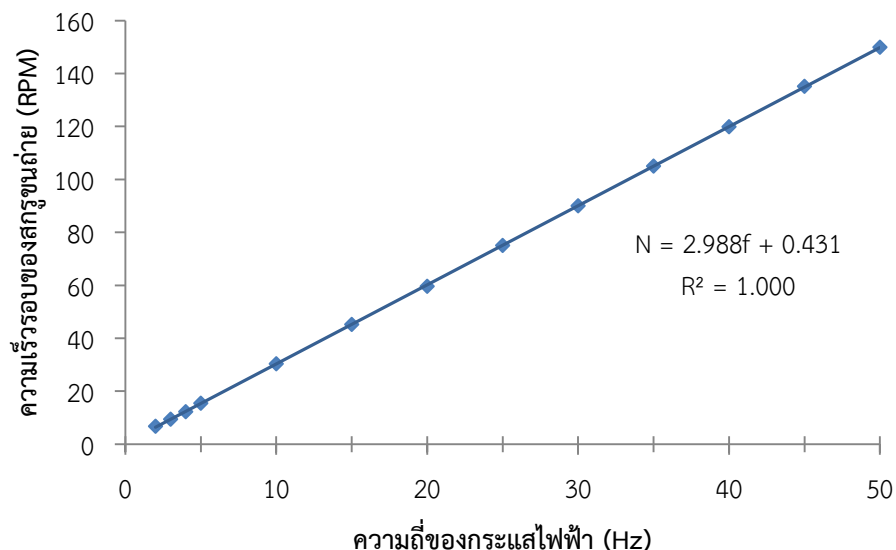
จากบทที่ผ่านมาเราได้ทราบถึงหลักการในการออกแบบชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผสม รวมถึงวิธีการทดสอบการทำงานของชุดทดสอบ และเงื่อนไขการทดสอบการเผาไหม้ของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว สำหรับบทนี้จึงเป็นการนำเสนอผลการทดลอง และการอภิปรายผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจะนำไปสู่ข้อสรุปทางด้านสมรรถนะการทำงานของระบบต่างๆ รวมไปถึงสมรรถนะ และย่านการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผสมชนิดห้องเผาไหม้ช่วยต่อไป

6.1 ผลการทดสอบระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผสม

ระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผสมถือเป็นระบบหนึ่งที่มีความสำคัญต่อชุดทดสอบการเผาไหม้เป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นระบบที่ส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของหัวเผา หากเชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าสู่เตาในลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง อาจส่งผลให้การเผาไหม้เกิดความไม่ต่อเนื่อง ความดันหรือพฤติกรรมของการเผาไหม้ภายในหัวเผาเปลี่ยนไปอย่างกะทันหัน ซึ่งอาจจะนำไปสู่ปรากฏการณ์เป่าดับได้ ดังนั้นระบบป้อนเชื้อเพลิงที่ดีต้องสามารถลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถตอบสนองการเปลี่ยนอัตราการป้อนได้อย่างรวดเร็ว

6.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบสกรุนถ่ายกับความถี่ของกระแสไฟฟ้า

เนื่องจากการทดลอง สามารถปรับความเร็วรอบของสกรุนถ่ายได้ด้วยการปรับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์โดยการใช้อินเวอร์เตอร์ (inverter) ดังนั้นจึงต้องทราบค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการควบคุมอัตราการขนถ่ายของสกรู



ภาพที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของสกรุนถ่าย (RPM) - ความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz)

เมื่อพิจารณาภาพที่ 6.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของสกรูขนถ่าย (RPM) กับความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz) ที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรูขนถ่าย จะพบว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเป็นเชิงเส้น ซึ่งได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$N = 2.988 f + 0.431 \quad (6.1)$$

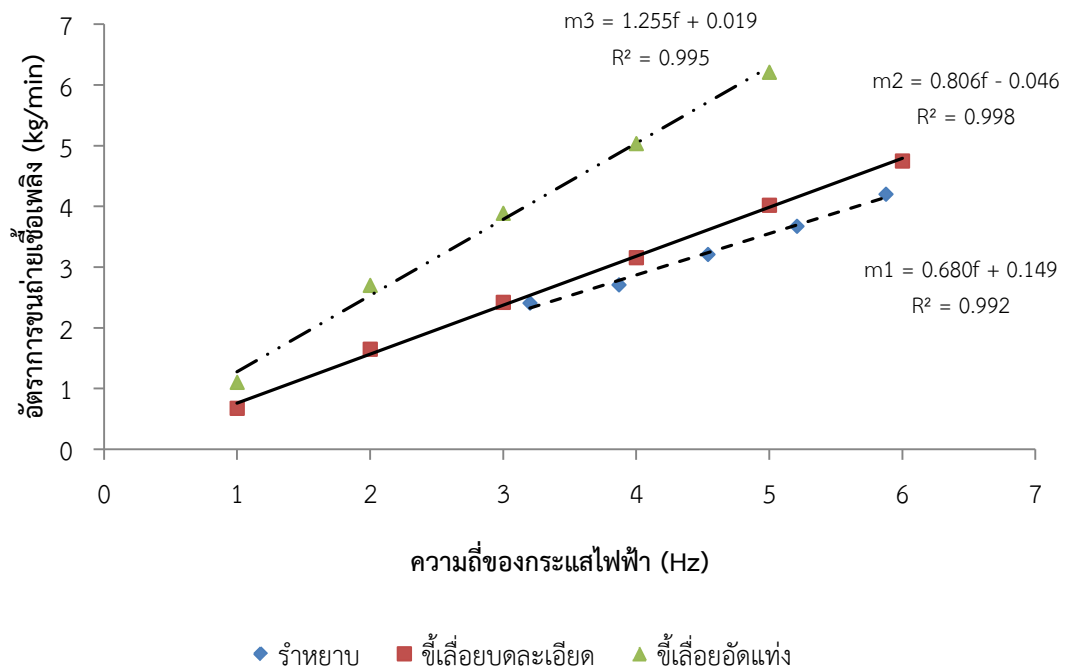
เมื่อ N คือความเร็วรอบของสกรูขนถ่าย (RPM)

f คือความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (Hz)

เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ (inverter) ที่นำมาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของสกรูขนถ่าย มีค่าความละเอียดในการปรับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.5 Hz นั้นคือจะสามารถปรับกระแสที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ได้ในย่าน 0.5 - 50 Hz ซึ่งจากสมการความสัมพันธ์ที่ 6.1 จะพบว่าความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายที่สามารถควบคุมได้คือ 1.925 - 149.831 รอบต่อนาที

6.1.2 การทดลองหาอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงชีวมวล

จากหัวข้อที่ผ่านมาทำให้ทราบแล้วว่า ตัวแปรต้นที่เป็นตัวกำหนดหรือควบคุมความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายคือความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์ เพื่อความสะดวกในการใช้ข้อมูลจึงต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่าย (kg/min) ต่อความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (Hz) ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิง (kg/min) - ความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz)

จากภาพที่ 6.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิง (kg/min) ต่อความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz) ของเชื้อเพลิงสามชนิดที่มีความหนาแน่นที่ต่างกัน คือ รำหยาบ ขี้เลื่อย บดละเอียด และขี้เลื่อยอัดแท่ง ซึ่งเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดจะแสดงความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นเชิงเส้นระหว่างตัวแปรทั้งสอง แต่ความชันของความเป็นเชิงเส้นจะแตกต่างกัน ซึ่งได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$m_1 = 0.680 f + 0.149 \text{ (kg/min)} \quad (6.2)$$

$$m_2 = 0.806 f + 0.046 \text{ (kg/min)} \quad (6.3)$$

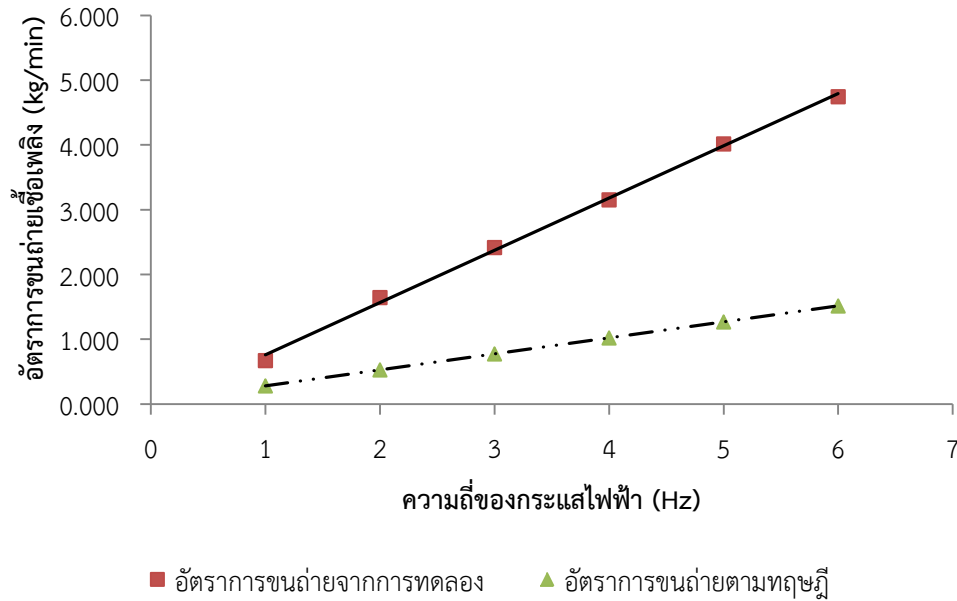
$$m_3 = 1.255 f + 0.019 \text{ (kg/min)} \quad (6.4)$$

โดยที่ m_1 , m_2 และ m_3 คืออัตราการขนถ่ายของรำหยาบ ขี้เลื่อยบดละเอียด และขี้เลื่อยอัดแท่ง (pellet) ตามลำดับ หากต้องการทราบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายต่อความเร็วรอบของใบสกรูสามารถนำความสัมพันธ์สมการที่ 6.1 แทนค่าในสมการที่ 6.2 6.3 และ 6.4 ได้ ตัวอย่างเช่นเมื่อแทนค่าสมการที่ 6.1 ในสมการที่ 6.3 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายต่อความเร็วรอบใบสกรู ของขี้เลื่อยบดละเอียดดังนี้

$$m_2 = 0.269 N + 0.07 \text{ (kg/min)} \quad (6.5)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 3.4 การคำนวณอัตราการขนถ่ายตามทฤษฎี จะสังเกตเห็นว่ามีสองตัวแปรที่ส่งผลต่ออัตราการขนถ่าย คือความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (ρ_b) และแฟกเตอร์ความเต็มรางของ วัสดุ (k) ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ต่างกัน ก็จะทำให้พฤติกรรมความเป็นเชิงเส้นที่มีความแตกต่างกัน เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าระหว่างความหนาแน่นของเชื้อเพลิงกับแฟกเตอร์ความเต็มรางของวัสดุ ตัวแปรใดที่มีอิทธิพลต่ออัตราการขนถ่ายมากกว่ากัน จึงต้องทำการศึกษาเปรียบเทียบอัตราขนถ่ายทางทฤษฎีที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.4 กับอัตราขนถ่ายจากการทดลองของสกรูลำเลียงที่ความเร็วรอบต่างๆ โดยทำการพิจารณาอัตราการขนถ่ายของเชื้อเพลิงที่จะถูกนำไปใช้ในการทดลองการเผาไหม้ต่อไป นั่นคือขี้เลื่อยบดละเอียด ที่มีความหนาแน่นประมาณ 396 kg/m^3 ซึ่งได้ผลการเปรียบเทียบดังภาพที่ 6.3

จากผลการเปรียบเทียบในภาพที่ 6.3 พบว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบเท่ากัน อัตราการขนถ่ายที่ได้จากการทดลองจะมีค่ามากกว่าอัตราการขนถ่ายที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองคือ ค่าแฟกเตอร์ความเต็มรางของวัสดุ (k) (แฟกเตอร์ความเต็มรางที่ใช้ในการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 0.3) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการขนถ่าย ถ้าค่าแฟกเตอร์ความเต็มรางของวัสดุยิ่งมากจะทำให้วัสดุขนถ่ายไหลตัวได้ดี มีผลทำให้อัตราการขนถ่ายสูงขึ้นด้วย จากผลการทดลองเราสามารถคำนวณย้อนกลับเพื่อหาแฟกเตอร์ความเต็มรางของวัสดุได้จากสมการที่ 3.4 ซึ่งผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 6.1



ภาพที่ 6.3 เปรียบเทียบอัตราการผลิตจากการทดลอง กับอัตราการผลิตตามทฤษฎี ($k=0.3$)

ตารางที่ 6.1 การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาแฟกเตอร์ความเต็มร่างของสกรุนถ่าย

ความถี่ของ กระแสไฟฟ้า (Hz)	ความเร็วรอบของ สกรุนถ่าย (RPM)	ขี้เลื่อยอัดแท่ง (pellet)		ขี้เลื่อยบดละเอียด	
		อัตราการผลิต ขนถ่าย (kg/min)	แฟกเตอร์ความ เต็มร่าง (k)	อัตราการผลิต ขนถ่าย (kg/min)	แฟกเตอร์ความ เต็มร่าง (k)
1.00	3.420	1.100	0.713	0.673	0.715
2.00	6.410	2.697	0.932	1.646	0.933
3.00	9.400	3.885	0.915	2.418	0.935
4.00	12.390	5.033	0.899	3.154	0.925
5.00	15.380	6.208	0.894	4.017	0.950

ในการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาแฟกเตอร์ความเต็มร่างของสกรุนั้น ได้ทำการคำนวณเปรียบเทียบเชื้อเพลิงสองชนิดที่มีขนาด และความหนาแน่นที่ต่างกัน ได้แก่ ขี้เลื่อยอัดแท่ง และขี้เลื่อยบดละเอียด ที่มีความหนาแน่นประมาณ 650 และ 396 kg/m^3 ตามลำดับ จากตารางที่ 6.1 จะพบว่าค่าแฟกเตอร์ความเต็มร่างเฉลี่ยของขี้เลื่อยอัดแท่งจะอยู่ที่ 0.871 ในขณะที่ขี้เลื่อยบดละเอียดจะมีแฟกเตอร์ความเต็มร่างเฉลี่ยประมาณ 0.899 ซึ่งค่าทั้งสองมีความใกล้เคียงกันมากจนอาจจะกำหนดให้มีค่าเท่ากันที่ประมาณ 0.9

สาเหตุหลักที่ส่งผลให้แฟกเตอร์ความเต็มร่างของวัสดุสองชนิดที่มีลักษณะทางกายภาพ และความหนาแน่นที่ต่างกันค่อนข้างมาก มีค่าใกล้เคียงกันอาจจะเนื่องมาจากสกรุนถ่ายที่ทำการออกแบบมีรางสกรูที่สั้น ส่งผลให้การสูญเสียระหว่างการขนถ่ายเกิดขึ้นน้อยมาก จนอาจจะกล่าวได้ว่าสำหรับสกรุนถ่ายที่มีความยาวไม่มาก แฟกเตอร์ความเต็มร่างของวัสดุแทบจะไม่ส่งผลต่ออัตราการผลิตวัสดุเลย ดังนั้น

ตัวแปรต้นที่ส่งผลต่ออัตราการขนถ่ายวัสดุจะถูกตัดเหลือเพียงตัวแปรเดียวนั้นคือ ความหนาแน่นของวัสดุ (ρ_b) เมื่อทำการแทนค่าคงที่ของการออกแบบสกรูขนถ่ายดังตารางที่ 4.9 ลงในสมการที่ 3.4 จะทำให้ได้สมการในการประมาณค่าอัตราการขนถ่ายของชุดสกรูขนถ่ายที่ทำการออกแบบไว้ดังนี้

$$m_s = 0.000632 \rho_b N \text{ (kg/min)} \quad (6.6)$$

หรือ

$$m_s = \rho_b (0.0019 f + 0.0003) \text{ (kg/min)} \quad (6.7)$$

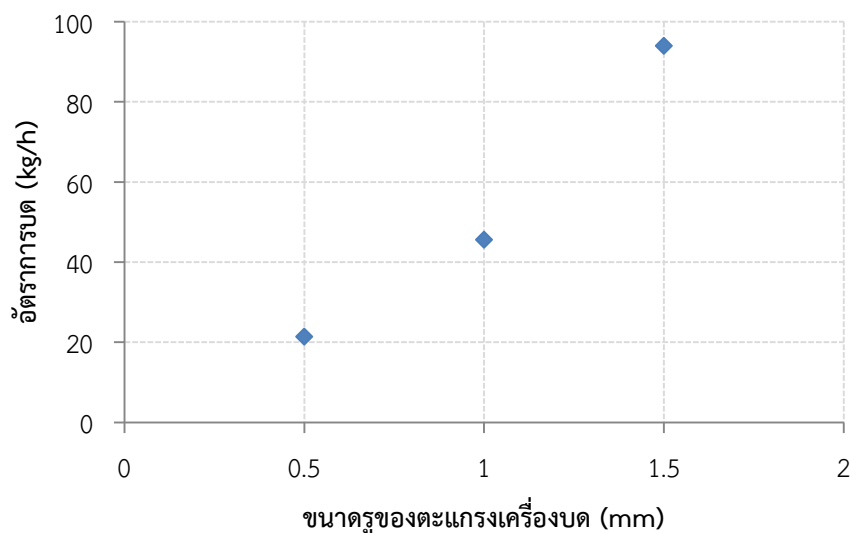
แต่อย่างไรก็ตามสมการ 6.6 และ 6.7 เป็นเพียงสมการที่ใช้ในการประมาณค่าอัตราการขนถ่ายของสกรูขนถ่ายเครื่องนี้เท่านั้น ซึ่งสมการทั้งสองจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (% error) ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่ใช้ขนถ่าย หากต้องการความแม่นยำของอัตราการขนถ่าย ควรจะทำการทดลองเพื่อหาอัตราการขนถ่ายซ้ำอีกครั้งหนึ่ง

6.1.3 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องบด

เครื่องบดเป็นอุปกรณ์ที่ถูกเพิ่มเติมเข้ามาเพื่อแก้ปัญหาคุณภาพของเชื้อเพลิงดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.3.4 และเนื่องจากเครื่องบดที่ทำการติดตั้งนั้น เป็นเครื่องบดสำเร็จภาพที่ได้รับมาจากผู้ผลิต จึงต้องทำการทดสอบสมรรถนะต่างๆของเครื่อง ได้แก่ อัตราการผลิต และการวิเคราะห์ขนาดของเชื้อเพลิงที่ผ่านการบด เป็นต้น

6.1.3.1 การทดสอบความสามารถของเครื่องบด

เป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบอัตราการผลิตที่แท้จริง เมื่อขนาดของตะแกรงเปลี่ยนแปลงไป



ภาพที่ 6.4 การเปรียบเทียบอัตราการผลิตของเครื่องบดต่อขนาดรูของตะแกรงเครื่องบด

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบกำลังการผลิตจริงกับข้อมูลจากผู้ผลิต

รุ่น MODEL	มอเตอร์ POWER (Hp : kW)	รอบเครื่อง* SPEED (RPM)	กำลังการผลิต CAPACITY (kg/hr)			
			จากผู้ผลิต	จากการทำงานจริง ตามขนาดตะแกรง		
				0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm
YPT-302 (F/S)	5 : 3.7	4000	150-300	21.42	45.60	93.96

จากการทดสอบการทำงานของเครื่องบดแบบ Pin mill ที่มีความเร็วรอบของจานหมุนประมาณ 4000 รอบต่อนาที ใช้มอเตอร์ขนาด 5 Hp โดยใช้ตะแกรงที่มีขนาดรู 0.5 mm. 1 mm. และ 1.5 mm. พบว่าเมื่อตะแกรงมีขนาดรูที่ใหญ่ขึ้น เครื่องบดจะมีอัตราการบดที่มากขึ้น แต่เมื่อเทียบกับกำลังการผลิตที่ได้จากผู้ผลิต จะเห็นได้ว่ากำลังการผลิตจริงของเครื่องบดนั้นน้อยมาก สาเหตุเนื่องจากขนาดตะแกรงที่ทางผู้ผลิตรับรองอัตราการผลิตมานั้นอาจจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดที่ใช้ในการทดสอบมาก หรือเนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ในการบดนั้นมีคุณสมบัติที่ต่างกัน อีกทั้งเชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้ในการทดสอบนั้นเป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใย และมีความเหนียวสูง จึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งของอัตราการบดที่ต่ำ ซึ่งลักษณะเชื้อเพลิงชีวมวลก่อนและหลังการบดแสดงดังภาพที่ 6.5



(a)



(b)

ภาพที่ 6.5 ลักษณะเชื้อเพลิงชีวมวล (a) ลักษณะเชื้อเพลิงก่อนกระบวนการบด และ (b) ลักษณะเชื้อเพลิงหลังผ่านกระบวนการบด

6.1.3.2 การทดสอบขนาดของเชื้อเพลิงที่ผ่านการบด

จากการนำตัวอย่างเชื้อเพลิงที่บดผ่านตะแกรงที่มีขนาดรู 0.5 mm ซึ่งเชื้อเพลิงที่ผ่านตะแกรงนั้นจะต้องมีขนาดเล็กกว่า 0.5 mm เมื่อนำไปทดสอบขนาดของเชื้อเพลิงที่แท้จริงผ่านวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (sieve analysis) จะได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 6.3 ซึ่งพบว่าอนุภาคเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.180-0.299 mm คิดเป็น 25.53 % รองลงมาคือขนาดเล็กกว่า 0.075 mm คิดเป็น 24.39 % ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.425 mm. จะมีสัดส่วนอยู่เพียง 2.57 % เท่านั้น แสดงว่าเชื้อเพลิงที่ได้มีความละเอียดกว่าขนาดที่ต้องการคือขนาด 0.5 mm ซึ่งจะส่งผลดีต่อระบบการเผาไหม้ นั่นคือความละเอียดของเชื้อเพลิงชีวมวล ทำให้พื้นที่ผิวในการเผาไหม้มีมากขึ้นเทียบกับ

เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่กว่าในปริมาตรที่เท่ากัน ทำให้ระบบเผาไหม้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ซึ่งค่าสัดส่วนของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงที่ได้มานั้นจะถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลต่อไป

ตารางที่ 6.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงที่ผ่านการบด

ขนาดอนุภาคเชื้อเพลิง	% by mass
425 - 500 μm	2.57
300 - 424 μm	16.83
180 - 299 μm	25.53
150 - 179 μm	12.56
75 - 149 μm	18.12
0 - 74 μm	24.39

6.1.3.3 วิเคราะห์การทำงานของเครื่องบด

เนื่องจากในการทดสอบการเผาไหม้นั้นต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีความละเอียดที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงต้องใช้ตะแกรงที่มีขนาดรู 0.5 mm. แต่เนื่องจากตะแกรงขนาดดังกล่าวส่งผลให้เชื้อเพลิงจะค้างอยู่ในเครื่องบดเป็นเวลานาน และอัตราการบดของเครื่องบดค่อนข้างที่จะต่ำ ไม่เพียงพอต่อการป้อนเชื้อเพลิงเพื่อทดสอบการเผาไหม้ที่กำลังความร้อนสูงๆ (200 kW ขึ้นไป) หากทำการป้อนเชื้อเพลิงแบบเม็ดลงเข้าสู่เครื่องบดอย่างต่อเนื่อง ด้วยอัตราที่สูงกว่ากำลังผลิตของเครื่องบด จะทำให้เกิดการอัดแน่นของเชื้อเพลิงภายในเครื่องบด จนหมุนไม่สามารถทำงานได้เป็นผลทำให้เครื่องบดนั้นหยุดการทำงาน นั่นคือ การทำงานที่เกินขีดจำกัดของเครื่องบด โดยระยะเวลาก่อนที่เครื่องบดนั้นจะทำงานเกินขีดจำกัดนั้น น้อยกว่าระยะเวลา 30 นาที ที่ต้องการให้ระบบทำงานต่อเนื่อง เพื่อไม่ให้เครื่องบดเป็นอุปสรรคของงานวิจัย และให้ระบบทั้งหมดทำงานได้อย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ในขอบเขตการศึกษา จึงได้ทำการแยกเครื่องบดออกจากระบบ และทำการบดเชื้อเพลิงเก็บสะสมไว้ จนได้ปริมาณที่เพียงพอต่อการใช้งานทดสอบการเผาไหม้

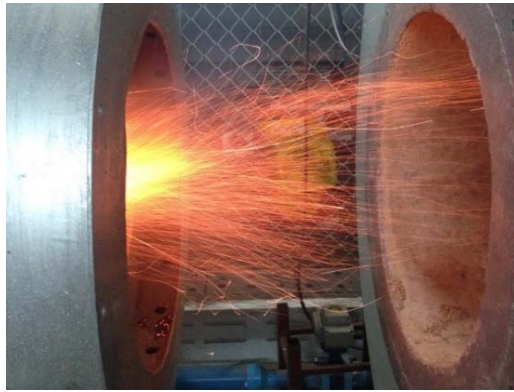
6.2 ผลการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

ในการทดสอบการเผาไหม้เพื่อหาสมรรถนะ และย่านการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมานั้น ต้องทำการทดสอบเป็นลำดับขั้น ได้แก่ การทดสอบสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิง การทดสอบขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีความเหมาะสม และการทดสอบอิทธิพลขององศาใบบิด (swirler blade) เป็นต้น เพื่อนำผลสรุปจากการทดลองนั้นๆ ไปใช้เป็นตัวแปรควบคุมของการทดลองในขั้นถัดไป

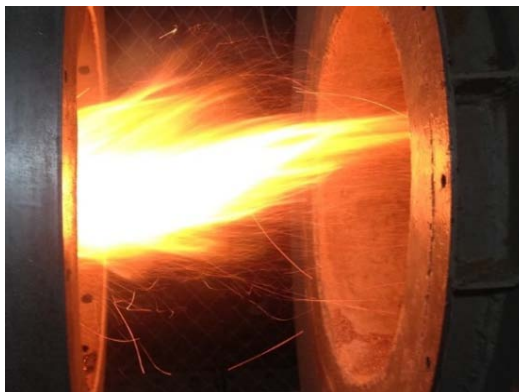
6.2.1 อิทธิพลของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงต่อพฤติกรรมของการเผาไหม้

จากผลการทดสอบระบบป้อนเชื้อเพลิงในหัวข้อข้างต้น ทำให้ทราบถึงกำลังการผลิตสูงสุดของเครื่องบดในแต่ละขนาดของรูตะแกรง โดยหากจะเปรียบเทียบกำลังการผลิตของเครื่องบดต่อการผลิตกำลังความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ จะพบว่าเครื่องบดที่ใช้รูตะแกรงขนาด 0.5 mm. 1 mm. และ 1.5 mm. จะสามารถบด และป้อนเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกำลังความร้อนได้ประมาณ 100 kW 200 kW และ 400 kW ตามลำดับ ดังนั้นหัวข้อนี้จึงเป็นการตรวจสอบพฤติกรรมของการเผาไหม้ของหัวเผานชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ที่ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน เพื่อระบุขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีความเหมาะสมกับหัวเผา โดยจะทำการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ อนุภาคเชื้อเพลิงขนาดดังกล่าว ซึ่งคาดหวังว่าการทดลองในลำดับถัดไปจะสามารถใช้อุณหภูมิเชื้อเพลิงขนาด 1.5 mm. ได้หากอนุภาคเชื้อเพลิงขนาด 1.5 mm. สามารถที่จะเผาไหม้ได้ดีภายในห้องเผาไหม้ช่วย จะส่งผลให้ประหยัดเวลา และพลังงานในการบดเชื้อเพลิงเก็บก่อนทำการทดลอง หรืออาจจะทำให้สามารถบดเชื้อเพลิงแล้วป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยได้โดยตรง

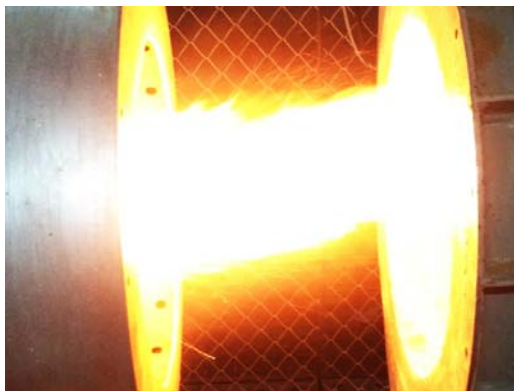
เมื่ออนุภาคเชื้อเพลิงวิ่งเข้าปะทะกับเปลวไฟนําร่องของแก๊ส LPG อนุภาคเชื้อเพลิงจะเข้าสู่กระบวนการแห้ง (drying) อุณหภูมิของอนุภาคสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำ จนน้ำเกิดการระเหย จากนั้นอุณหภูมิจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเข้าสู่กระบวนการปลดปล่อยสารระเหย (devolatilization) กระบวนการเผาไหม้สารระเหย และการเผาไหม้ถ่านชาร์ (char combustion) ตามลำดับ ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดกระบวนการ (resident time) เหล่านี้ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วของแก๊สร้อนที่พัดพาอนุภาค และขนาดของอนุภาค เป็นต้น เมื่อพิจารณาลักษณะเปลวไฟบริเวณช่องทางออกของหัวเผาดังแสดงในภาพที่ 6.6 พบว่าลักษณะของเปลวไฟที่เกิดจากอนุภาคเชื้อเพลิงที่ลอดผ่านรูตะแกรงขนาด 1.5 mm. จะมีลักษณะที่เป็นเส้นทางเดินของปฏิกิริยาการเผาไหม้ อนุภาคชาร์อย่างเห็นได้ชัดเจน นั้นแสดงว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (resident time) ภายในห้องเผาไหม้ช่วยสั้นกว่าระยะเวลาที่อนุภาคขนาดดังกล่าวต้องการใช้ในการเผาไหม้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วยจะเป็นเพียงปฏิกิริยาการแห้ง และปฏิกิริยาการปลดปล่อยสารระเหย ในส่วนของปฏิกิริยาการเผาไหม้ถ่านชาร์จะหลุดออกมาเกิดบริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งพฤติกรรมนี้จะส่งผลให้การเผาไหม้อาจเกิดขึ้นแบบไม่สมบูรณ์ และเมื่อเพิ่มกำลังความร้อนให้สูงขึ้นความเร็วของแก๊สภายในห้องเผาไหม้ช่วยก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้การรักษาเสถียรภาพของฐานของเปลวไฟเป็นไปได้ยาก โอกาสในการเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับก็มีโอกาสที่จะเกิดขึ้นได้สูงเช่นกัน



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 6.6 เปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีขนาดของอนุภาคต่างกัน (a) อนุภาคขนาด 1.5 mm., (b) อนุภาคขนาด 1.0 mm. และ (c) อนุภาคขนาด 0.5 mm.

เมื่อพิจารณาการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงที่ลอดผ่านรูตะแกรงขนาด 1 mm. ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มไปในทางที่ดีกว่าเปลวไฟที่เกิดจากอนุภาคขนาด 1.5 mm. คือปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งทั้งสามปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย แต่ยังคงปรากฏเห็นเส้นทางเดินของปฏิกิริยาการเผาไหม้อนุภาคคาร์ที่หลุดออกมาจากห้องเผาไหม้ช่วยมากพอสมควร ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้คาร์จะเลื่อนเข้าไปเกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย แต่จากลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นคาดการณ์ว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้คาร์นั้นน่าจะเกิดขึ้นที่บริเวณผนังทางออกของห้องเผาไหม้ช่วย หรือส่วนปลายของห้องเผาไหม้ช่วย จึงทำให้ยังสังเกตเห็นเส้นทางเดินของปฏิกิริยาดังกล่าว ถึงแม้ว่าจะใช้ของสาคบปิดที่ทำให้เกิดการหมุนควงของอากาศมากที่สุดเท่าที่หัวเผาจะทำได้แล้วก็ตาม ในขณะที่เมื่อพิจารณาการเผาไหม้อนุภาค

เชื้อเพลิงที่ลอดผ่านรูตะแกรงขนาด 0.5 mm. ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มไปในทางที่ดีกว่า เปลวไฟที่เกิดจากอนุภาคสองขนาดที่ผ่านมา สังเกตเห็นเส้นทางเดินของปฏิกิริยาการเผาไหม้ชาร์บ่างเล็กน้อย ซึ่งคาดการณ์ว่าจะเกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 0.30 mm. ขึ้นไปซึ่งมีปะปนอยู่ประมาณ 20 % ของกลุ่มอนุภาคเชื้อเพลิง สอดคล้องกับทฤษฎีการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงแข็ง ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณผิวภายนอกของอนุภาค แล้วค่อยๆลามเข้าหาใจกลางของอนุภาค และเมื่อพิจารณาภาพที่ 2.4 จะสังเกตเห็นว่าเมื่ออนุภาคเชื้อเพลิงมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ฐานของเปลวไฟจะค่อยๆเลื่อนออกไปสู่บริเวณส่วนปลายของห้องเผาไหม้ เนื่องจากที่สภาวะการเผาไหม้เดียวกัน เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ต้องการใช้ระยะเวลาในกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยที่ค่อนข้างนาน ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ชาร์บ่างช้าตามไปด้วย นอกจากนี้การเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กจะให้อุณหภูมิที่สูงกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงขนาดใหญ่ ซึ่งบ่งชี้ว่าอนุภาคเชื้อเพลิงขนาดเล็กจึงมีระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สั้นกว่า และจากลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการทดลองทำให้คาดการณ์ได้ว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งทั้งสามปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย และด้วยอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กจึงถูกอิทธิพลของอากาศที่หมุนควงเหวี่ยงให้เกิดการคลุกเคล้าภายในห้องเผาไหม้ช่วย จึงเป็นเหตุผลให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ชาร์บ่างส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วยนั่นเอง

จากพฤติกรรมของเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงทั้งสามกรณี จึงได้ตั้งสนใจเลือกใช้เชื้อเพลิงที่ลอดผ่านรูตะแกรงขนาด 0.5 mm. เพื่อทำการทดสอบการเผาไหม้สำหรับการทดลองในขั้นถัดไป เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มกำลังความร้อนในการเผาไหม้ให้สูงขึ้น จะส่งผลให้ความเร็วของกระแสแก๊สร้อน และของไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วยจะสูงขึ้นตามไปด้วย ถ้าอนุภาคเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่ จนเกินไปการรักษาเสถียรภาพฐานของเปลวไฟอาจทำได้ยากยิ่งขึ้น การเผาไหม้อาจจะไม่ต่อเนื่องจนไม่สามารถเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) ของการเผาไหม้ หรืออาจจะเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ (blow off) ได้ ด้วยข้อจำกัดในด้านกำลังการผลิตของเครื่องบดที่หากต้องการเชื้อเพลิงที่มีความละเอียดกว่านี้ จะต้องใช้ระยะเวลาในการบดเชื้อเพลิงเป็นเวลานาน และสิ้นเปลืองพลังงาน และต้องใช้เครื่องบดที่มีสมรรถนะที่ดีกว่านี้ รวมไปถึงปริมาณเชื้อเพลิงที่ได้รับมามีอยู่อย่างจำกัด จึงไม่อาจเสี่ยงทำการทดสอบกับอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ได้

6.2.2 อิทธิพลขององศาใบพัด (swirl blade) ต่อพฤติกรรมของการเผาไหม้

การทดสอบในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบสมรรถนะของใบพัดในการสร้างกระแสอากาศที่มีลักษณะหมุนควงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย โดยจะทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย ที่องศาของใบพัดที่แตกต่างกันสามระดับระหว่างมุม 100 องศา ถึง 60 องศา ซึ่งเป็นย่านการปรับองศาที่ใบพัดจะสามารถทำได้

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น เมื่อเชื้อเพลิงแข็งเคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณที่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (reacting zone) เชื้อเพลิงจะเริ่มกระบวนการทำแห้ง (drying) และกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพที่ 6.7 แสดงพฤติกรรมของการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ที่องศาของใบพัดต่างกัน โดยทำการบันทึกภาพบริเวณด้านหลังของหัวฉีดเชื้อเพลิงชีวมวลผง เมื่อผงเชื้อเพลิงถูกพ่นออกจากหัวฉีด จะสังเกตเห็นลำของเชื้อเพลิงที่มีลักษณะคล้ายหมอกสีเทา ซึ่งบริเวณนี้ถูกคาดการณ์ว่าจะเป็นบริเวณของการเกิดกระบวนการทำแห้ง และการปลดปล่อยระเหย ดังนั้นกลุ่มหมอกดังกล่าวก็คือกลุ่มของไอน้ำ และสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิงนั่นเอง ซึ่งปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับผลการจำลองการเผาไหม้ในภาพที่ 6.8 การกระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหยภายใน

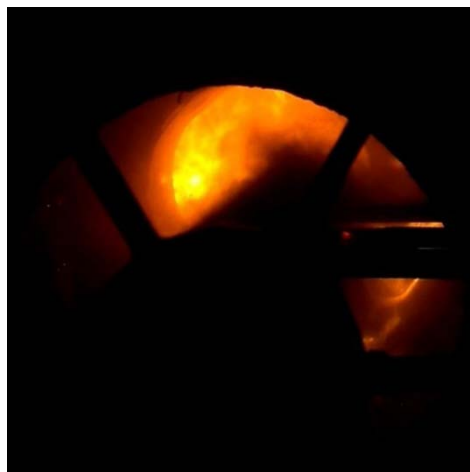
ห้องเผาไหม้ช่วย ที่พบว่าบริเวณที่เกิดหมอกนั้นจะเป็นบริเวณที่เกิดกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย และ เป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารระเหยมากที่สุด



(a)

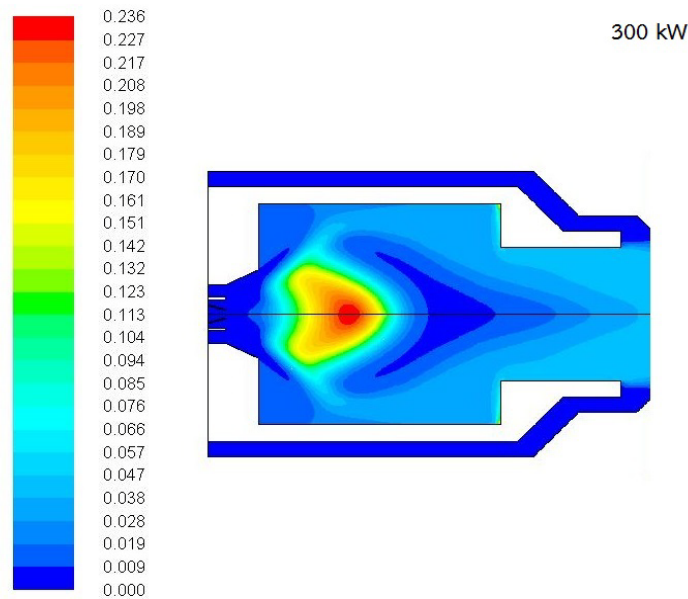


(b)



(c)

ภาพที่ 6.7 พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ที่ห้องสาขาของไบบัดต่างกัน (a) ไบบัด 100 องศา, (b) ไบบัด 85 องศา และ (c) ไบบัด 60 องศา



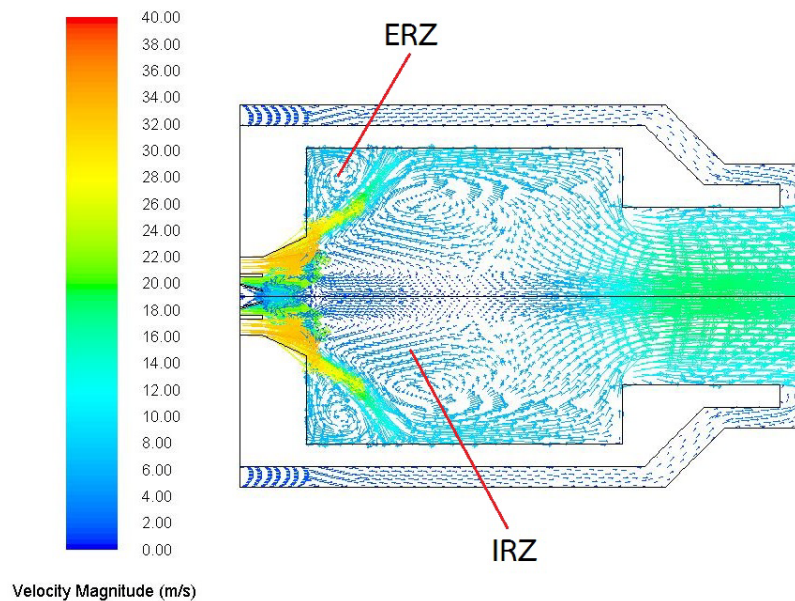
ภาพที่ 6.8 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหย (Mass Fraction) ภายในหัวเผา

ระหว่างที่กระบวนการปลดปล่อยสารระเหยดำเนินการอยู่นั้น สารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาก่อนหน้านี้จะถูกเผาไหม้บริเวณผิวโดยรอบอนุภาคเชื้อเพลิงซึ่งจะส่งผลให้อนุภาคเชื้อเพลิงสูงขึ้น และจะเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ซ้ำต่อไป จากภาพที่ 6.7 จะเห็นได้ว่าหมอกสีเทา หรือกลุ่มของอนุภาคที่ปกคลุมด้วยไอน้ำ และสารระเหยจะถูกล้อมรอบด้วยเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้สารระเหยดังกล่าว หากกระแสการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วยได้รับอิทธิพลของอากาศหมุนควงที่มีความรุนแรงที่มากพอ จะเหนี่ยวนำให้เกิดการหมุนวนของกระแสบริเวณแกนกลางของห้องเผาไหม้ช่วย (internal recirculation zone, IRZ) และการหมุนวนของกระแสภายนอกแกนกลางของเตาเผา (external recirculation zone, ERZ) ดังแสดงในภาพที่ 6.9 กระแสการหมุนวนทั้งสองบริเวณนี้จะส่งผลให้กลุ่มอนุภาคเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้ และติดไฟแล้วเหวี่ยงกลับมาชนกับกลุ่มหมอกอนุภาคที่ถูกส่งเข้ามาใหม่ ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อน ทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ จนนำไปสู่การเผาไหม้อย่างต่อเนื่องได้

เมื่อพิจารณาภาพที่ 6.7a พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่มุมไบปิด 100 องศาจะพบว่าเมื่อผงเชื้อเพลิงถูกพ่นออกจากหัวฉีด อนุภาคของเชื้อเพลิงจะได้รับอิทธิพลของอากาศหมุนควง (swirl) จนสามารถมองเห็นถึงความเป็นป่วนของเปลวไฟได้อย่างชัดเจน เปลวไฟมีลักษณะที่บานออกและห่อหุ้มหมอกของอนุภาคเชื้อเพลิง ซึ่งคาดว่าความรุนแรงของกระแสอากาศหมุนควงที่เกิดจากไบปิดที่มุมองศานี้ จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนวนที่บริเวณ IRZ และ ERZ จึงทำให้การเผาไหม้จะเกิดขึ้นบริเวณกลางค่อนมาหาส่วนต้นของห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งการที่จุดเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ หรือฐานของเปลวไฟอยู่ที่บริเวณส่วนต้นของหัวเผาเช่นนี้ จะส่งผลดีต่อเสถียรภาพของการเผาไหม้ จนส่งผลให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องได้โดยไม่เกิดปรากฏการณ์เป่าดับ

ในขณะที่เมื่อพิจารณาภาพที่ 6.7b พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่มุมไบปิด 85 องศา ที่มุมนี้ความรุนแรงของกระแสอากาศหมุนควงจะมีค่าน้อยกว่าที่มุมไบปิด 100 องศา ซึ่งน้อยจนไม่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนวนที่บริเวณ ERZ ส่งผลให้บริเวณการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เลื่อนไปอยู่กลางค่อนไปหาส่วนท้ายของหัวเผา แต่อย่างไรก็ตามความรุนแรงของกระแสไหลควงที่เกิดจากองศาไบปิดนี้ยังสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนวนบริเวณส่วนท้ายของห้องเผาไหม้ช่วยได้ จึงทำให้ฐานของเปลวไฟยังคงอยู่ภายในห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งหากทำการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 300 kW พฤติกรรม

ของเปลวไฟเช่นนี้ก็จะยังคงรักษาเสถียรภาพของการเผาไหม้เอาไว้ได้ และยังเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง แต่หากทำการเผาไหม้ที่กำลังความร้อนให้สูงขึ้นกว่านี้ ปริมาณเชื้อเพลิง และความเร็วของลำเชื้อเพลิงที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดจะมากกว่านี้ ถึงแม้ว่าความเร็วของอากาศที่หมุนควงจะสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน แต่โอกาสที่ฐานของเปลวไฟจะหลุดออกนอกห้องเผาไหม้ช่วยนั้นมีความเป็นไปได้สูง ดังนั้นการเผาไหม้ที่กำลังความร้อนสูงๆ มุมไบปิดที่ 85 องศา อาจจะสร้างความรุนแรงของอากาศหมุนควงที่ไม่เพียงพอ ซึ่งเสี่ยงต่อการรักษาเสถียรภาพของการเผาไหม้ จนนำไปสู่ปรากฏการณ์เป่าดับได้



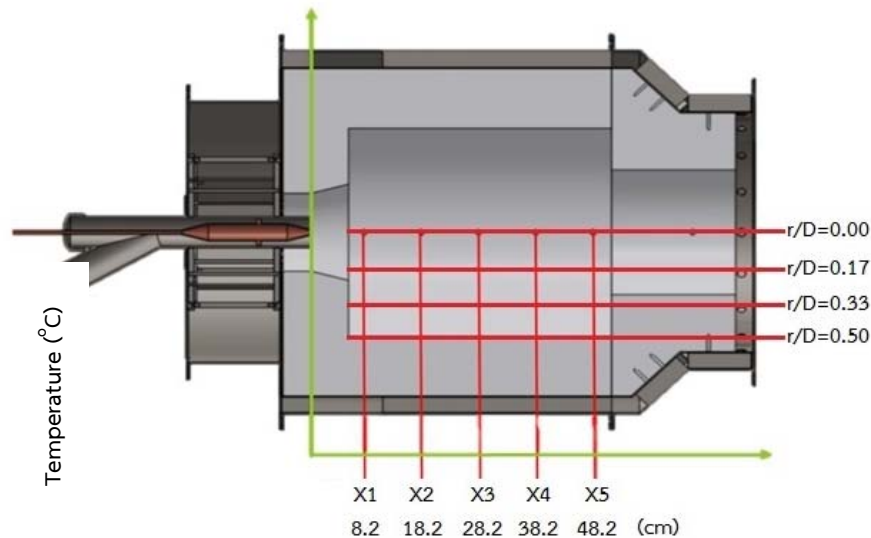
ภาพที่ 6.9 เวกเตอร์ความเร็วของแก๊สภายในหัวเผา pre-chamber

แต่เมื่อพิจารณาภาพที่ 6.7c พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่มุมไบปิด 60 องศา พบว่าอากาศหมุนควงที่เกิดจากมุมไบปิดนี้มีความรุนแรงที่น้อยมาก จนไม่สามารถสร้างกระแสความปั่นป่วนของอากาศภายในห้องเผาไหม้ช่วยได้ ปฏิบัติการเผาไหม้จึงไม่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย ลำของอนุภาคเชื้อเพลิงที่พุ่งออกจากหัวฉีดจะวิ่งไปปะทะกับผนังทางออก แต่ด้วยอิทธิพลของม่านอากาศส่วนที่สาม จึงทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงเกิดการคลุกเคล้า และอนุภาคน้ำมันที่ยังสูงเนื่องจากการทดลองก่อนหน้านี้ จึงทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงติดไฟในที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อคงการเผาไหม้ที่สภาวะนี้ไว้ อนุภาคน้ำมัน และเปลวไฟจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ ซึ่งเป็นสัญญาณของการเข้าสู่วิวัฒนาการของปรากฏการณ์การเป่าดับนั่นเอง

ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Norbert Modlinski [9] ซึ่งพบว่าอากาศหมุนควงจะส่งผลต่อเสถียรภาพของเปลวไฟบริเวณหัวฉีดเชื้อเพลิง เมื่อมุมของไบปิดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การลุกติดไฟของเชื้อเพลิงเกิดเร็วขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวยังส่งผลต่อตำแหน่งของฐานเปลวไฟ โดยอิทธิพลของอากาศที่หมุนควงจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนวนของแก๊สร้อนบริเวณใกล้หัวฉีด (IZR) ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ซึ่งส่งผลให้อนุภาคของเชื้อเพลิงที่ถูกพ่นออกมาจากหัวฉีดเกิดการผสมกับกระแสของแก๊สร้อน สารระเหยจะถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคเชื้อเพลิง และเกิดการติดไฟในที่สุด จึงทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง

6.2.3 พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย

สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 400 kW และ 500 kW โดยในการบันทึกค่าของอุณหภูมิ จะทำการบันทึกการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งหมด 20 ตำแหน่งภายในห้องเผาไหม้ช่วยคือ 5 ตำแหน่งตามแนวแกน ตำแหน่งละ 4 ระนาบตามแนวรัศมี เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของห้องเผาไหม้ช่วย (D) ซึ่งตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิแสดงดังภาพที่ 6.10



ภาพที่ 6.10 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิ

6.2.3.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยตามระยะแนวแกน

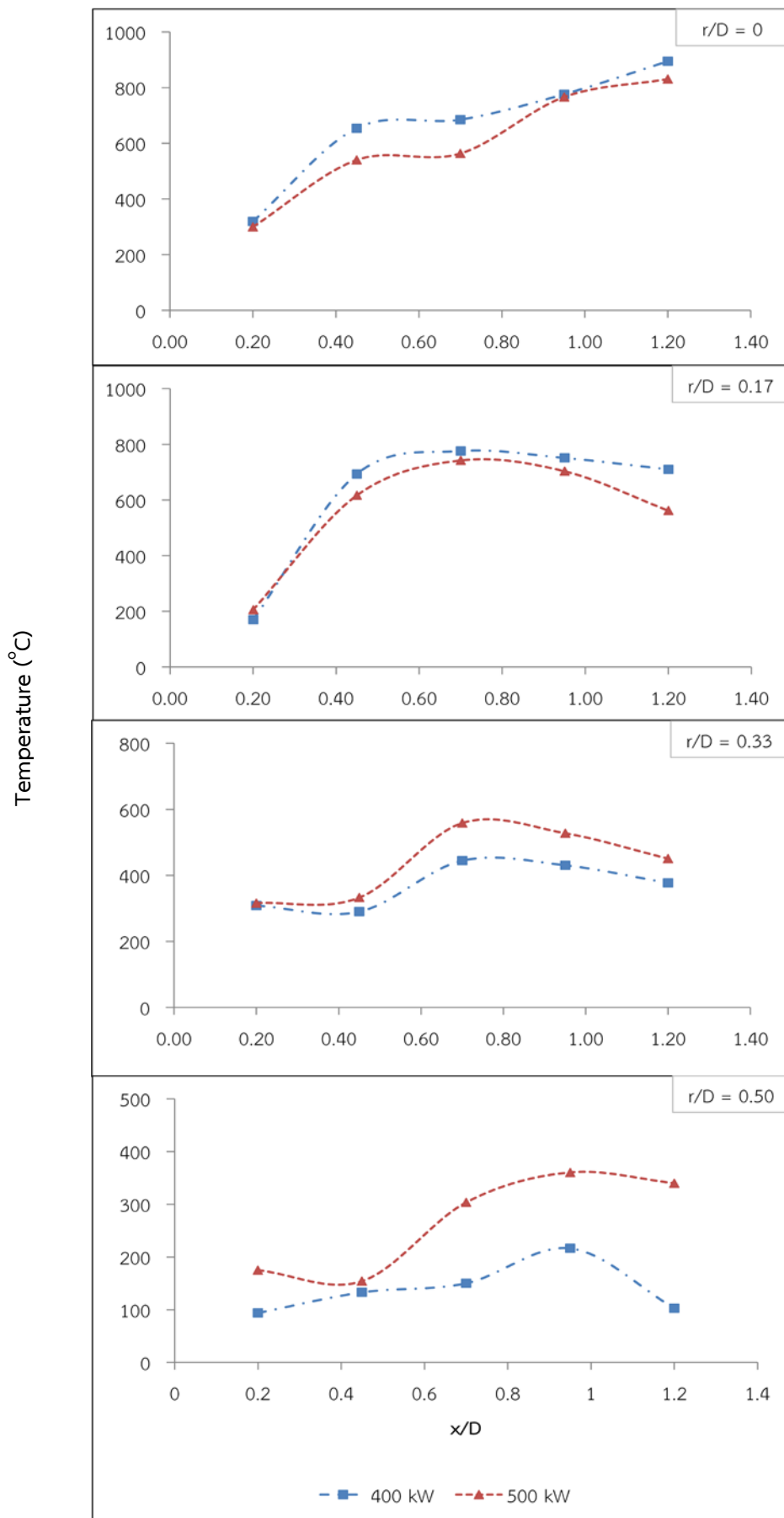
จากภาพที่ 6.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยตามระยะแนวแกน เมื่อทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ 400 kW และ 500 kW จะพบว่าทั้งสองย่านการเผาไหม้จะมีแนวโน้มการกระจายตัวของอุณหภูมิไปในทิศทางเดียวกัน ในทุกระนาบแนวรัศมี (r/D) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าทั้งสองย่านการเผาไหม้นั้น จะมีพฤติกรรม และลักษณะอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic) ของการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่คล้ายคลึงกัน

เมื่อพิจารณาที่ระนาบ $r/D=0$ หรือระนาบแนวแกนของห้องเผาไหม้ช่วย ที่ตำแหน่ง $x/D = 0.20$ เป็นตำแหน่งที่เชื้อเพลิงผงจะถูกพ่นออกมาจากท่อหัวฉีดพร้อมกับอากาศส่วนที่หนึ่ง (primary air) ทั้งที่เป็นตำแหน่งต้นๆที่เชื้อเพลิงถูกพ่นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย แต่อุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้กลับสูงถึงประมาณ 300°C เนื่องจากบริเวณนี้ได้รับอิทธิพลของกระแสหมุนวนบริเวณ IRZ ที่พากระแสของแก๊สร้อนกลับมาปะทะ และถ่ายเทความร้อนให้กับเชื้อเพลิงที่ถูกพ่นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย เมื่ออนุภาคเชื้อเพลิงปะทะเข้ากับแก๊สร้อนที่อุณหภูมิดังกล่าว จะส่งผลให้ความชื้น และสารระเหยที่อยู่ภายในอนุภาคถูกปลดปล่อยออกมาภายนอก ซึ่งมีลักษณะเป็นหมอกสีเทา ดังแสดงในภาพที่ 6.6 สารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาก่อนจะเกิดการเผาไหม้และลุกติดไฟบริเวณโดยรอบผิวของอนุภาคเชื้อเพลิงส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง (ประมาณ 650°C ที่ 400 kW และประมาณ 550°C ที่ 500 kW) และจากนั้นอุณหภูมิจะคงที่จนกว่ากระบวนการการปลดปล่อยสารระเหยจะสิ้นสุดลง จึงส่งผลให้อุณหภูมิที่บันทึกได้

จากตำแหน่ง $x/D = 0.70$ และตำแหน่ง $x/D = 0.95$ มีค่าใกล้เคียงกัน หลังพ้นจากระยะนี้ อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่เหลือ และกระแสของแก๊สร้อนที่ถูกอิทธิพลของอากาศหมุนควง (swirl) เหวี่ยงไปชนกับผนังของห้องเผาไหม้จะช่วยจะม้วนมารวมกันก่อนจะออกไปสู่ส่วนปลายของห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งระยะที่เกิดการรวมตัวกันของกระแสแก๊สร้อนที่สภาวะ 400 kW และ 500 kW น่าจะมีระยะที่ใกล้เคียงกันจึงส่งผลให้อุณหภูมิที่ตำแหน่ง $x/D = 0.95$ ของทั้งสองสภาวะนั้นเท่ากัน กระบวนเผาไหม้ถ่านชาร์ และสารระเหยที่คงเหลือจะเริ่มขึ้นที่บริเวณนี้ส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ สำหรับที่ระนาบนี้ แนวโน้มของอุณหภูมิที่สภาวะ 400 kW จะสูงกว่าที่ 500 kW ในทุกตำแหน่งของการบันทึกอุณหภูมิ เนื่องจากที่สภาวะ 500 kW อัตราการพัดพาของมวลอากาศเย็นที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้จะช่วยจะสูงกว่าที่สภาวะ 400 kW จึงทำให้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาดำกลัวนั้นเอง

เมื่อพิจารณาที่ระนาบ $r/D=0.17$ จะพบว่าที่ระนาบนี้เป็นระนาบที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดในบรรดาพิกัดที่ทำการศึกษา เนื่องจากเป็นระนาบของการเผาไหม้สารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิง ที่ตำแหน่ง $x/D = 0.20$ ตำแหน่งนี้เป็นยังคงเป็นบริเวณที่เชื้อเพลิงผกจะถูกพ่นออกมาจากท่อหัวฉีด และถูกอิทธิพลของอากาศส่วนที่สองซึ่งเป็นอากาศหมุนควงเหวี่ยงให้บานออกไปชนกันผนัง จึงทำให้ที่ตำแหน่งนี้มีอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่นๆ แต่แนวโน้มของอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าสู่ตำแหน่ง $x/D = 0.45$ และอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงตำแหน่ง $x/D = 0.70$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดของระนาบ เนื่องจากทั้งสองตำแหน่งนี้เป็นบริเวณของการเกิดกระแสหมุนวน IRZ ส่งผลให้แก๊สร้อน และเปลวไฟจากการเผาไหม้สารระเหยจะถูกเหวี่ยงวนกลับมาเพื่อคลุกเคล้า และถ่ายเทความร้อนให้กับอนุภาคที่ถูกส่งเข้ามาใหม่ เมื่อผ่านพ้นตำแหน่งนี้ไปอุณหภูมิจะเริ่มลดลงเนื่องจากกระแสของแก๊สร้อนจะหุบไปรวมตัวบริเวณแนวแกนก่อนจะออกสู่ส่วนท้ายของห้องเผาไหม้ช่วย สำหรับที่ระนาบนี้ แนวโน้มของอุณหภูมิที่สภาวะ 400 kW ยังคงสูงกว่าที่ 500 kW ในทุกตำแหน่งของการบันทึกอุณหภูมิ ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการพัดพาของมวลอากาศเย็นที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไปแล้วในย่อหน้าข้างต้น

แนวโน้มของอุณหภูมิที่สภาวะ 500 kW จะเริ่มมีค่าสูงกว่าที่สภาวะ 400 kW ในทุกตำแหน่งของการบันทึกอุณหภูมิที่ระนาบ $r/D=0.33$ เนื่องจากที่ระนาบนี้จะเป็นบริเวณขอบของเปลวไฟที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย เปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 500 kW จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเปลวไฟที่มากกว่า และเปลวไฟจะมีความกว้างสูงสุดบริเวณตำแหน่ง $x/D = 0.70$ และตำแหน่ง $x/D = 0.95$ จึงทำให้ที่ตำแหน่งดังกล่าวของระนาบนี้มีอุณหภูมิสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ เมื่อผ่านพ้นตำแหน่งนี้ไปอุณหภูมิจะเริ่มลดลงเนื่องจากกระแสของแก๊สร้อนจะหุบไปรวมตัวบริเวณแนวแกนก่อนจะออกสู่ส่วนท้ายของห้องเผาไหม้ช่วย เมื่อพิจารณาที่ระนาบ $r/D=0.5$ ซึ่งเป็นระนาบของผนังห้องเผาไหม้ช่วย อุณหภูมิของผนังห้องเผาไหม้จะช่วยจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อระยะตามแนวแกนเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิผนังจะมีค่าสูงสุดบริเวณตำแหน่งที่ $x/D = 0.95$ เนื่องจากเป็นบริเวณที่เปลวไฟจะมีความกว้างสูงสุด จึงทำให้เปลวไฟสัมผัสกับผนัง แต่เมื่อเข้าสู่ตำแหน่งที่ห้าอุณหภูมิผนังจะลดลงเนื่องจากการหุบรวมกันของเปลวไฟในลักษณะเช่นเดียวกับระนาบก่อนหน้า ในขณะที่แนวโน้มของอุณหภูมิที่สภาวะ 500 kW จะมีค่าสูงกว่าที่สภาวะ 400 kW ในทุกตำแหน่งของการบันทึกอุณหภูมิที่ระนาบ เนื่องจากที่ 500 kW กระแสแก๊สร้อนจะมีคาบ (aperture) และความรุนแรงในการหมุนควงมีมากกว่า จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนไปสู่ผนังมีมากกว่า



ภาพที่ 6.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยตามระยะแนวแกน

6.2.3.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยตามระยะแนวรัศมี

หลังจากที่ได้ทราบถึงลักษณะ และพฤติกรรมของการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ตามระยะแนวแกนในทุกระนาบแนวรัศมี (r/D) แล้ว สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมีในทุกระนาบแนวแกน (x/D) โดยจะทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ 400 kW และ 500 kW เพื่อให้มีความเข้าใจชัดเจนยิ่งขึ้น เมื่อพิจารณาภาพที่ 6.12 จะพบว่าทั้งสองย่านการเผาไหม้จะมีแนวโน้มการกระจายตัวของอุณหภูมิไปในทิศทางเดียวกัน ในทุกระนาบแนวแกน (x/D) ซึ่งให้เห็นว่าทั้งสองย่านการเผาไหม้นั้น จะมีลักษณะอากาศพลศาสตร์ของการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากหัวข้อข้างต้น

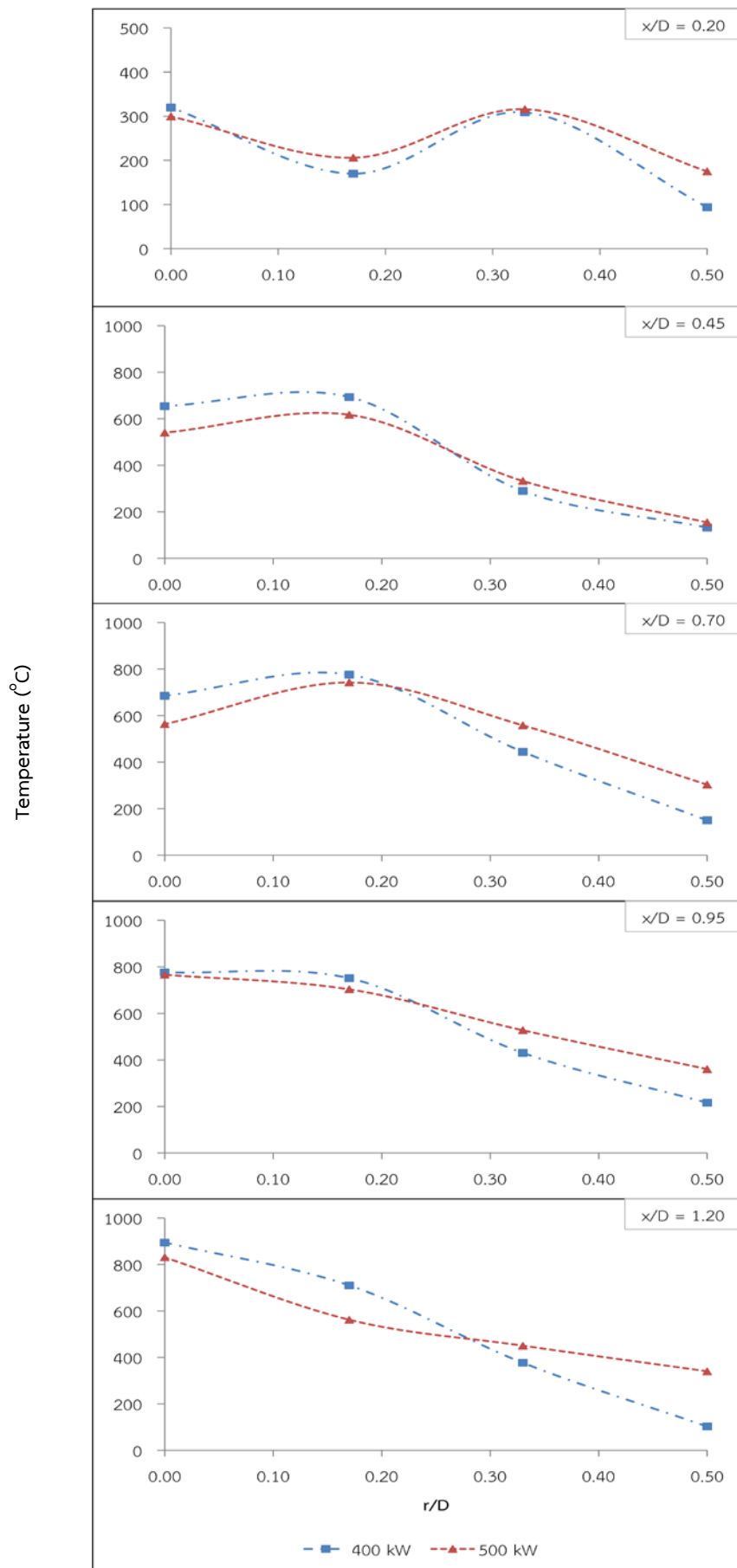
เมื่อพิจารณาที่ระยะ $x/D=0.2$ ซึ่งเป็นระยะที่อยู่ใกล้กับหัวฉีดเชื้อเพลิงซึ่งมวลผงมากที่สุด พบว่าตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดของระยะนาบจะอยู่ที่ตำแหน่งแนวแกน หรือ $r/D = 0.00$ ถึงแม้ว่าที่ตำแหน่งนี้จะตำแหน่งที่เชื้อเพลิงถูกพ่นออกมาจากหัวฉีดก็ตาม แต่ด้วยอิทธิพลของกระแสอากาศหมุนวนบริเวณ IRZ ที่พากระแสของแก๊สร้อนกลับมาปะทะ ตำแหน่งนี้จึงเป็นบริเวณที่เกิดการถ่ายเทความร้อนจึงส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้น แต่เมื่อเลื่อนเข้าสู่ตำแหน่ง $r/D = 0.17$ อุณหภูมิจะมีค่าลดลง อันเป็นผลมากระแสอากาศเย็นของอากาศส่วนที่สองที่เข้าสู่หัวเผาตรงกับตำแหน่งนี้ แม้ว่าบริเวณนี้ยังคงได้รับอิทธิพลของกระแสหมุนวน IRZ แต่กระแสอากาศเย็นที่เข้าสู่บริเวณนี้จะมีอัตราที่สูงกว่าในตำแหน่งแรกจึงทำให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้มีค่าต่ำกว่า แต่เมื่อพ้นระยะของกระแสอากาศเย็นจึงทำให้อุณหภูมิที่บริเวณตำแหน่ง $r/D = 0.33$ มีค่าสูงขึ้น และนอกจากนี้ที่ตำแหน่ง $r/D = 0.33$ ยังได้รับอิทธิพลของกระแสหมุนวน ERZ จึงส่งผลให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้ใกล้เคียงกับที่ตำแหน่งแรก และอุณหภูมิจะลดลงอีกครั้งเมื่อเลื่อนเข้าสู่ผนังห้องเผาไหม้

เมื่อพิจารณาที่ระยะ $x/D=0.45$ และ $x/D=0.70$ ทั้งสองระยะนี้เป็นระยะที่อยู่ในบริเวณของกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยของอนุภาคเชื้อเพลิง จึงทำให้กราฟของสองระยะนาบนี้มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน โดยอนุภาคเชื้อเพลิงจะเริ่มเข้าสู่กระบวนการทำแห้ง (drying) และกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยตั้งแต่ระยะแรกๆที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย สารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาก่อนหน้านี้จะลุกติดไฟ และเกิดการเผาไหม้บริเวณผิวของอนุภาคเชื้อเพลิง ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณแกนกลางเตาสูงขึ้น และสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงตำแหน่ง $r/D = 0.17$ ซึ่งเป็นบริเวณที่คาดว่าจะเกิดกระแสหมุนวน IRZ หมอกสีเทาของสารระเหยจะค่อยๆจางลง และวิวัฒนาการเป็นเปลวไฟสีส้ม อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระแสหมุนวนของแก๊สร้อนกับอนุภาคของเชื้อเพลิงจะเกิดขึ้นสูง จึงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นถึงประมาณ 800°C จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเข้าสู่ตำแหน่ง $r/D = 0.33$ และตำแหน่ง $r/D = 0.50$ ซึ่งเป็นผนังของห้องเผาไหม้ช่วย เนื่องจากทั้งสองตำแหน่งนี้อยู่บนเส้นทางการไหลของอากาศส่วนที่สอง (secondary air) เกิดการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟ หรือกระแสของแก๊สร้อนไปสู่กระแสของอากาศเย็น จึงเป็นเหตุผลให้อุณหภูมิลดลง

เมื่อกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยใกล้จะสิ้นสุดลง อนุภาคของเชื้อเพลิงจะเริ่มเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ถ่านชาร์ สารระเหยที่ยังคงเหลือ และชาร์จะถูกเผาไหม้ไปพร้อมกันจึงส่งผลให้อุณหภูมิในการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาภาพที่ 6.8 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหย ทำให้คาดการณ์ได้ว่าที่ระยะ $x/D=0.95$ จะเป็นระยะที่กระบวนการปลดปล่อยสารระเหยใกล้จะสิ้นสุดลง อุณหภูมิบริเวณแกนกลางเตาจึงเพิ่มสูงขึ้นไปถึง 800°C และอุณหภูมิจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเข้าสู่ตำแหน่ง $r/D = 0.17$ ของระยะนาบ หลังจากนั้นอุณหภูมิจะลดลงเมื่อระยะตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้น เหตุที่เป็นเช่นนี้

เนื่องจากอิทธิพลของอากาศส่วนที่สองซึ่งเป็นอากาศหมุนควง พฤติกรรมที่หมุนควงนี้จะเหนี่ยวนำให้กระแสของแก๊สร้อนเหวี่ยงมารวมกันบริเวณแกนกลางของห้องเผาไหม้ช่วย ก่อนจะเคลื่อนตัวออกไปยังช่องทางออก จึงส่งผลให้ตำแหน่ง $r/D = 0.17$ มีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับบริเวณแกนกลางห้องเผาไหม้ ส่วนตำแหน่ง $r/D = 0.33$ และผนังห้องเผาไหม้ ($r/D = 0.50$) กระแสของแก๊สร้อนจะโค้งหลบพอดีจึงทำให้อุณหภูมิลดต่ำลง เมื่อทำการพิจารณาที่ตำแหน่งแกนกลางของห้องเผาไหม้ช่วยที่ระนาบ $x/D=1.20$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดที่บันทึกค่าได้จากห้องเผาไหม้ช่วย เนื่องจากตำแหน่งนี้เป็นบริเวณที่กระแสของแก๊สร้อนมารวมตัวกันก่อนจะเคลื่อนตัวออกสู่เตาเผา ซึ่งจะส่งผลให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรุนแรง อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นสูงถึง 900°C แต่อุณหภูมิของระนาบนี้จะลดลงเรื่อยๆเมื่อระยะตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นบริเวณที่กระแสของแก๊สร้อนจะโค้งหลบเพื่อไปรวมตัวบริเวณแกนกลาง จึงส่งผลให้อุณหภูมิลดต่ำลงเช่นเดียวกับระนาบก่อนหน้า

ถึงแม้ว่าลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมี ที่สภาวะการเผาไหม้ 400 kW และ 500 kW จะมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันในทุกระนาบแนวแกน (x/D) แต่ที่ระนาบ $x/D=0.20$ การกระจายตัวของอุณหภูมิที่สภาวะ 500 kW จะสูงกว่าที่ 400 kW เนื่องจากอิทธิพลของอากาศหมุนควง (swirl) และกระแสอากาศหมุนวนบริเวณ IRZ และ ERZ ที่ 500 kW จะมีความรุนแรงที่มากกว่า จึงเป็นผลให้กระแสของแก๊สร้อนหมุนวนกลับมาถ่ายเทความร้อนให้กับเชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยในอัตราที่สูงกว่า ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกันกับการที่บริเวณใกล้ผนังของห้องเผาไหม้ในทุกระนาบ x/D ที่อุณหภูมิของ 500 kW จะสูงกว่าที่ 400 kW เนื่องจากกระแสอากาศหมุนควงที่รุนแรงกว่า เปลวไฟจึงรัศมีเปลวที่กว้างกว่า การถ่ายเทความร้อนจากแก๊สร้อนไปสู่ผนังห้องเผาไหม้ช่วยจึงมีมากกว่านั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณใกล้แกนกลาง และอุณหภูมิสูงสุดที่บันทึกได้จากภายในห้องเผาไหม้ช่วยของที่สภาวะ 400 kW จะสูงกว่าที่ 500 kW อยู่เล็กน้อยซึ่งเป็นผลมาจากที่ 500 kW กระแสอากาศเย็นที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยจะมีปริมาณ และความเร็วที่สูงกว่า ถึงแม้ว่าอากาศหมุนควง (swirl) และกระแสอากาศหมุนวนบริเวณ IRZ และ ERZ ที่ 500 kW จะมีความรุนแรงที่มากกว่า แต่ระยะเวลา (resident time) ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สร้อนกับอนุภาคของเชื้อเพลิงกลับสั้นกว่า จึงทำให้เชื้อเพลิงเคลื่อนตัวออกจากหัวเผาก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้ได้อย่างเต็มที่

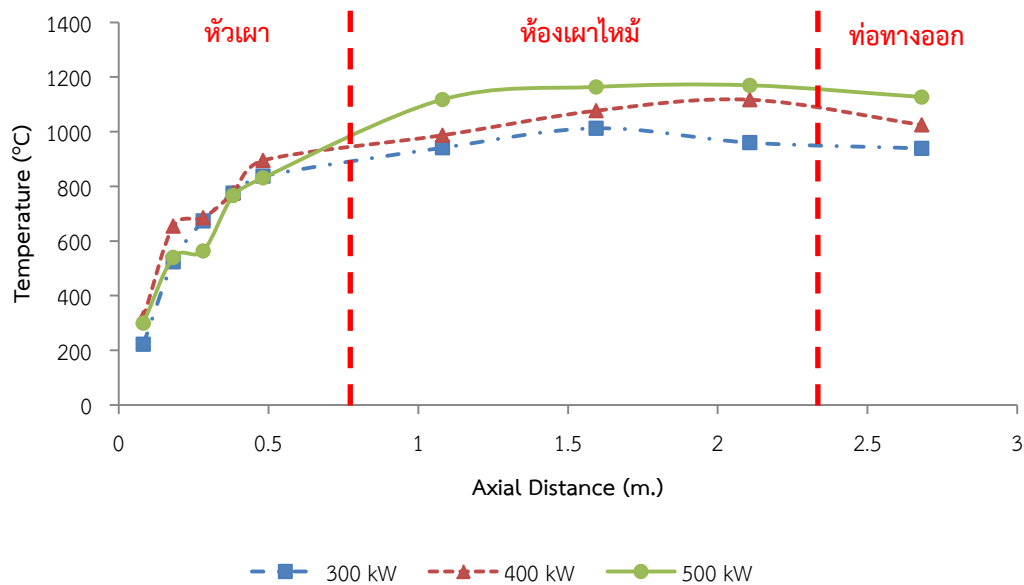


ภาพที่ 6.12 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยตามระยะแนวรัศมี

6.2.4 การศึกษาย่านการทำงานหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย

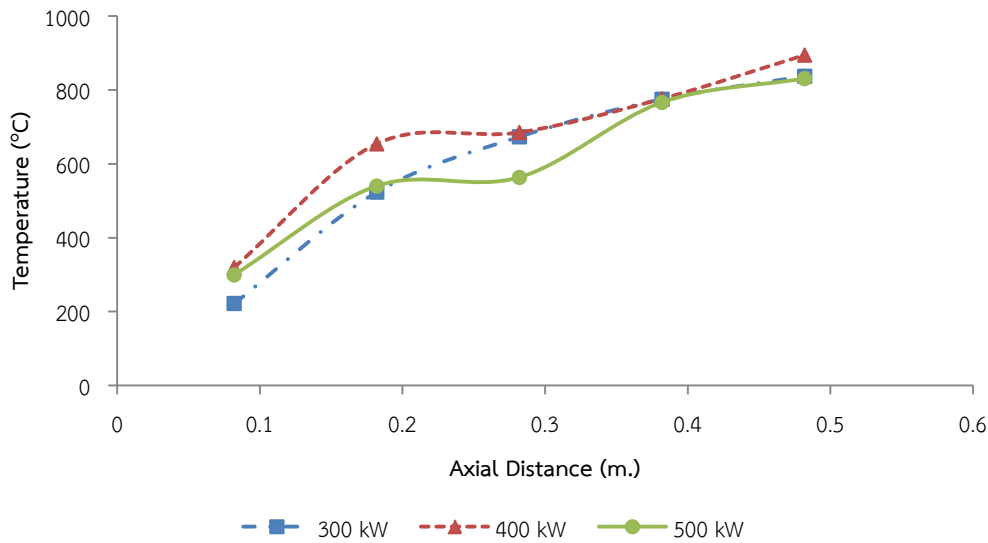
ในการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงนั้น จะถูกจำกัดการทดสอบด้วยปัจจัยในหลายๆด้าน เช่น ความสามารถในการบดเชื้อเพลิงของเครื่องบด ขนาดของโบลเวอร์ (blower) และขีดความสามารถของชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้ที่ทำการออกแบบขึ้น เป็นต้น ด้วยข้อจำกัดดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ในช่วง 250 kW ถึง 500 kW โดยใช้องศาไบบิตที่ 100 องศา

6.2.4.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน

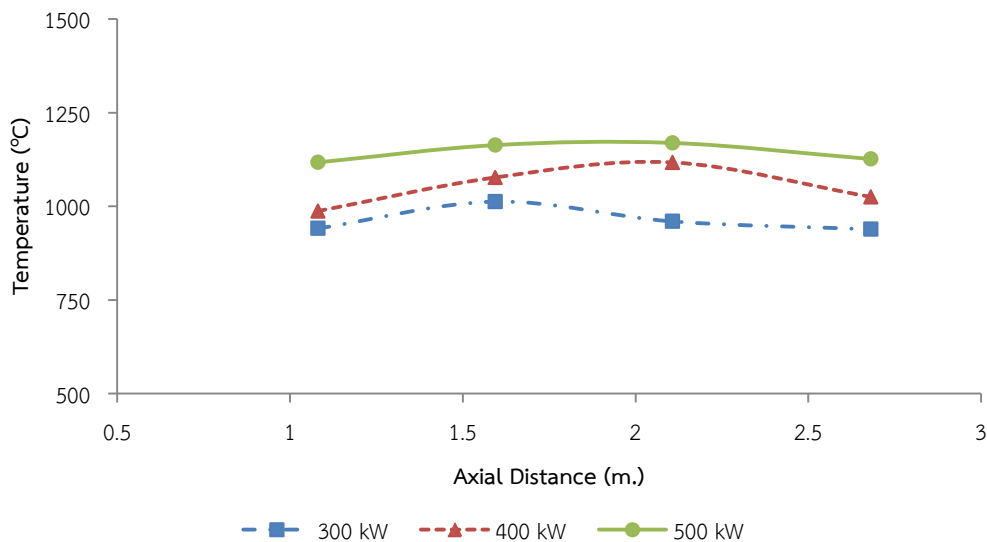


ภาพที่ 6.13 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน

สำหรับการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 250 kW ไม่สามารถเก็บข้อมูลการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดจากการเผาไหม้ได้ เนื่องจากที่สภาวะนี้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เกิดควันที่มีลักษณะลอยตัวต่ำ และกลิ่นในปริมาณสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการเผาไหม้ในภาพที่ 4.14 และ 4.15 โดยจากผลการจำลองพบว่าที่สภาวะ 250 kW นั้นจะเหลืออนุภาคคาร์บอนและสารระเหยที่ไม่ได้รับการเผาไหม้หลงเหลืออยู่พอสมควร ซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิงที่ถูกอิทธิพลของ swirl เหวี่ยงไปชนกับผนังของห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ จึงไม่ได้รับการเผาไหม้ และลอยไปกับไอเสีย



ภาพที่ 6.14 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน (ภายในหัวเผา)



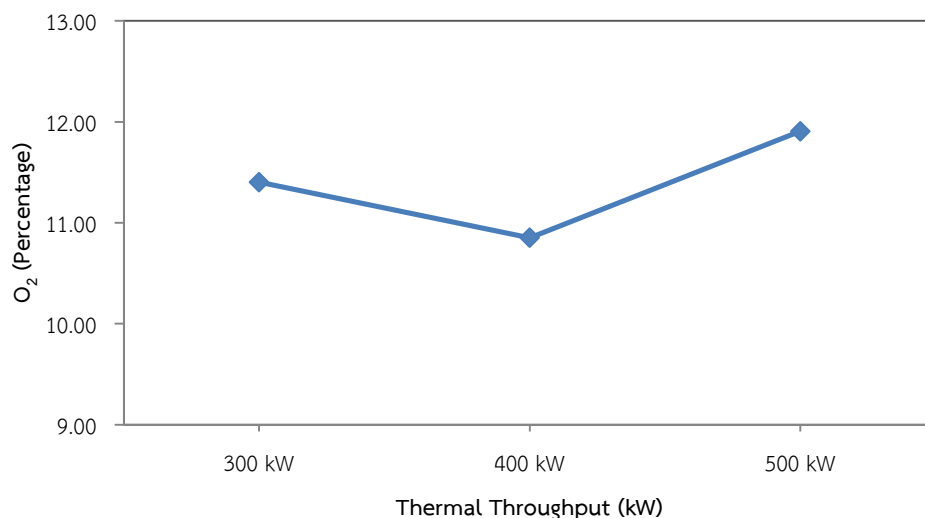
ภาพที่ 6.15 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน (ภายในห้องเผาไหม้)

เมื่อพิจารณาภาพที่ 6.13 - ภาพที่ 6.15 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนที่กำลังการเผาไหม้ 300 kW 400 kW และ 500 kW ตามลำดับ จะพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยของทั้งสามย่านการเผาไหม้มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วยนั้นถูกอธิบายไว้ในหัวข้อข้างต้น แต่ลักษณะที่สังเกตเห็นเพิ่มเติมจากภาพที่ 6.14 คือที่สภาวะ 300 kW ตำแหน่งที่สอง และตำแหน่งที่สามของการบันทึกข้อมูลจะมีค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากที่ 300 kW นี้ความเร็วในการฉีดเชื้อเพลิง (primary air) และอากาศส่วนที่สอง (secondary air) ที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยจะน้อยกว่าที่สภาวะ 400 kW และ 500 kW ส่งผลให้ระยะทางในการปลดปล่อยสารระเหยสั้นกว่า จึงทำให้ระยะในการรวมตัวกันของเปลวไฟ และกระแสของแก๊สร้อน เลื่อนเข้ามาสู่บริเวณกึ่งกลางของห้องเผาไหม้ช่วย ก่อนจะเคลื่อนตัวออกไปยังห้องเผาไหม้

เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ (furnace) ดังแสดงในภาพที่ 6.15 ยังคงพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ของทั้งสามย่านการเผาไหม้มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน เส้นแนวโน้มของอุณหภูมิที่ 500 kW จะสูงกว่าที่ 400 kW และ 300 kW ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลที่ทำการบินที่พบได้ว่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดจากการเผาไหม้ของทั้งสามสถานะจะอยู่ภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ไม่ได้ถูกเผาไหม้ภายในหัวเผา แต่มาถูกเผาไหม้ภายในเตาเผาแทน นั่นคืออนุภาคเชื้อเพลิง สารระเหย และถ่านชาร์ที่ไม่ได้รับการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยจะได้รับอิทธิพลของอากาศส่วนที่สาม และเกิดการเผาไหม้ซ้ำอีกครั้งบริเวณห้องเผาไหม้ โดยอุณหภูมิสูงสุดของที่สถานะ 300 kW จะอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางห้องเผาไหม้ และจะลดลงเรื่อยๆก่อนจะถึงบริเวณท่อทางออก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความยาวของเปลวไฟที่สถานะนี้จะอยู่ที่ระยะกึ่งกลางห้องเผาไหม้ค่อนข้างไปหาส่วนท้ายของเตา ในขณะที่อุณหภูมิสูงสุดที่สถานะ 400 kW และ 500 kW จะเลื่อนมาอยู่บริเวณส่วนท้ายของห้องเผาไหม้ ซึ่งส่งผลให้เปลวไฟสัมผัสกับช่องผนังบริเวณทางออก โดยเฉพาะที่ 500 kW ซึ่งสามารถสังเกตเห็นการสัมผัสของเปลวไฟกับผนังทางออกอย่างชัดเจน จึงทำให้อุณหภูมิที่วัดได้จากท่อทางออกมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิสูงสุดที่บันทึกได้ภายในห้องเผาไหม้

6.2.4.2 ปริมาณแก๊สไอเสีย

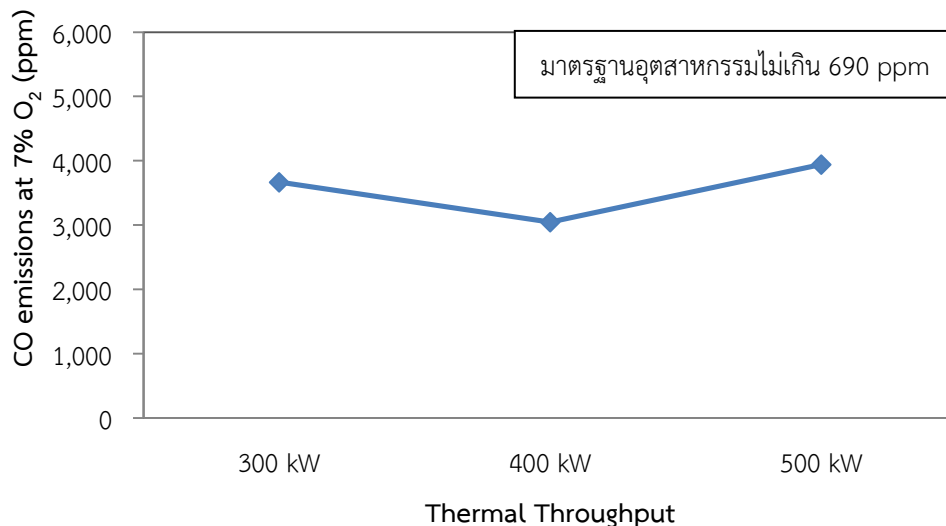
ไอเสียถือเป็นตัวแปรหนึ่งที่สามารถบ่งชี้ถึงสมรรถนะของชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้ได้ หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ดีต้องสามารถเหนี่ยวนำให้อากาศ และเชื้อเพลิงเกิดการผสมผสานจนเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และปลดปล่อยแก๊สพิษ (CO NO_x และ HC) ในปริมาณต่ำ



ภาพที่ 6.16 แสดงเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน (O₂) หลังการเผาไหม้

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน (O₂) ที่หลงเหลืออยู่ในแก๊สไอเสียที่สถานะการเผาไหม้ทั้งสามย่านดังแสดงในภาพที่ 6.16 จะพบว่า เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่วัดค่าได้จากไอเสียที่ 300 kW 400 kW และ 500 kW จะมีค่าเท่ากับ 11.40% 10.85% และ 11.90% ตามลำดับ ซึ่งเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่ทำการบินวัดค่าได้นั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน หากทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาปริมาณอากาศส่วนเกิน (%EA) จริงที่ใช้ในการเผาไหม้จะพบว่าทั้งสามสถานะจะใช้อากาศส่วนเกินเท่ากับ 135% 120% และ 150% ตามลำดับ ทั้งนี้ในตอนเริ่มต้นการป้อนอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยถูกควบคุมให้ใช้

อากาศส่วนเกินอยู่เพียงแค่ 15% เท่านั้น ซึ่งการที่วัดค่าเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่หลงเหลืออยู่กับไอเสียได้ในปริมาณที่สูงอาจจะเนื่องมาจากปัจจัยหลายๆด้าน เช่น การที่ชุดทดสอบการเผาไหม้ได้มีการติดตั้งพัดลมดูดแก๊สไอเสีย (ID fan) เอาไว้ จึงทำให้ภายในห้องเผาไหม้เกิดเป็นสุญญากาศขึ้น จึงส่งผลให้อากาศจากภายนอกถูกดูดเข้าไปสู่ห้องเผาไหม้ตรงบริเวณหน้าแปลนต่างๆ รวมไปถึงบริเวณรูเสียบเครื่องมือวัด นอกจากนี้อาจเป็นเพราะความชื้นที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิง และการระเหยของน้ำบริเวณสกรูระบายไถ่หนักที่จะส่งผลให้การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จึงทำให้ออกซิเจนถูกดึงไปใช้ในการทำปฏิกิริยาไม่หมด เป็นต้น ซึ่งเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่หลงเหลืออยู่ในไอเสียที่สภาวะ 400 kW จะมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งถ้ากำหนดให้เชื้อเพลิงมีความชื้นเท่ากัน ออกไป กำหนดให้อากาศภายนอกที่ถูกดูดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในอัตราที่เท่ากันเนื่องจากความดันภายในติดลบเท่ากัน จะทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 400 kW ออกซิเจนจะถูกดึงเข้าไปทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ในอัตราส่วนที่มากที่สุด ซึ่งอาจจะสันนิษฐานได้ว่าการเผาไหม้ที่ 400 kW นี้ จะให้การเผาไหม้ที่ดีกว่าอีกสองย่านที่เหลือ



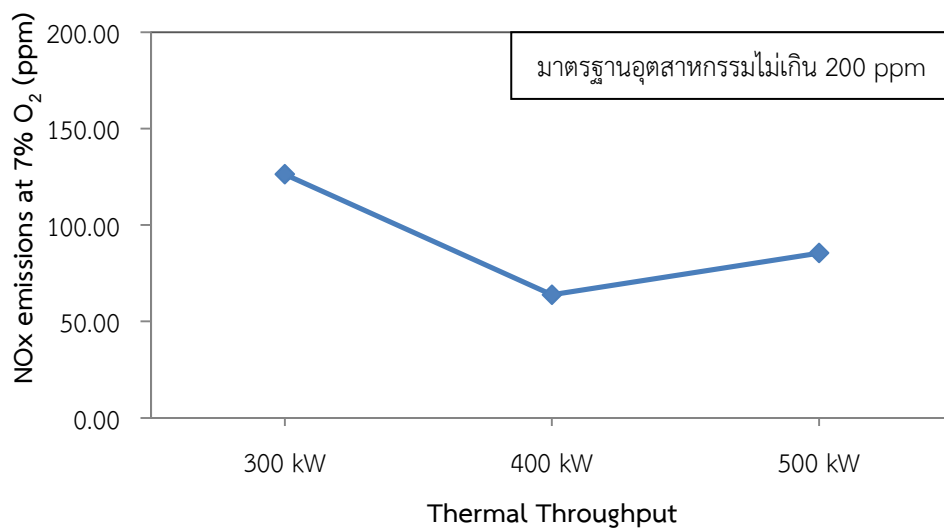
ภาพที่ 6.17 แสดงปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หลังการเผาไหม้

แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้อาจจะมีสาเหตุมาจากหลายด้าน เช่น สภาวะการเผาไหม้แบบส่วนผสมหนาเกินไป ปริมาณอากาศไม่เพียงพอ และการผสมคลุกเคล้ากันไม่ดีพอ เป็นต้น แต่จากที่ได้กล่าวไปในข้างต้น สำหรับการทดสอบการเผาไหม้นี้จะเหลืออากาศส่วนเกินที่ไปกับไอเสียในปริมาณที่ค่อนข้างสูง จึงทำให้ตัดข้อสันนิษฐานในสองประการแรกออกไปได้ ดังนั้นประเด็นที่ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จึงเกิดจากการผสมคลุกเคล้าที่ไม่ดีพอระหว่างอากาศและอนุภาคของเชื้อเพลิง เมื่อพิจารณาภาพที่ 6.17 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หลังการเผาไหม้ จะพบว่าสัดส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้จากไอเสียที่ 300 kW 400 kW และ 500 kW จะมีค่าเท่ากับ 3665 ppm 3045 ppm และ 3941 ppm ตามลำดับ โดยที่คาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้จากสภาวะ 400 kW มีค่าต่ำที่สุดซึ่งสอดคล้องกับข้อสันนิษฐานของการใช้ออกซิเจนในหัวข้อข้างต้น

ถึงแม้เปลวไฟของที่ 300 kW จะสั้นกว่าที่สภาวะอื่นๆ แต่ค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้ยังคงมีปริมาณที่สูง เกิดจากการที่เปลวไฟที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วยเกิดการรวมตัวกันอย่างรวมเร็ว จึงทำให้มีอนุภาคเชื้อเพลิง และสารระเหยบางส่วนที่ถูกกระแสน้ำของอากาศ

เหวี่ยงไปชนกับผนังบริเวณทางออก และเคลื่อนตัวหลบเปลวไฟและเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จึงทำให้อนุภาค และ สารระเหยกลุ่มนี้ไม่ได้รับการเผาไหม้นั่นเอง

นอกจากนี้สาเหตุที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คือการมีเวลาสั้นเกินไปในบริเวณของการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ เนื่องจากต้องระบายไอเสียออกทันที อุณหภูมิ ความดัน หรือพฤติกรรมในการเผาไหม้เปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ซึ่งเป็นสาเหตุของการที่สามารถวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียที่กำลังการเผาไหม้ 400 kW และ 500 kW ได้ในปริมาณที่สูง เนื่องจากเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ของทั้งสองยานั้น พุ่งเข้าสัมผัสกับบริเวณผนัง ส่วนท้ายของห้องเผาไหม้ก่อนจะออกสู่ท่อทางออก ซึ่งบริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องทางการไหลของแก๊สร้อน จึงทำให้พฤติกรรมการไหลเปลี่ยนแปลงไปอย่างกะทันหัน บวกกับจุดที่ทำการวัดไอเสีย ปฏิกิริยาการเผาไหม้ยังไม่สิ้นสุด จึงทำให้วัดค่าของคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณที่สูง



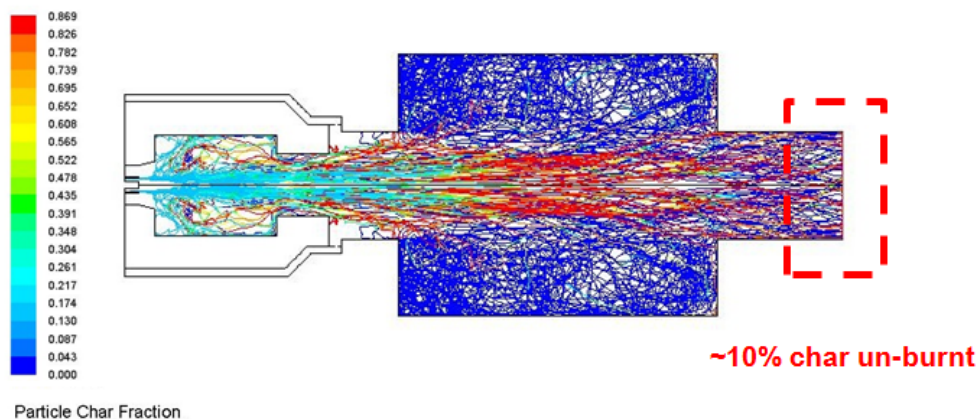
ภาพที่ 6.18 แสดงปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) หลังการเผาไหม้

เมื่อพิจารณาปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่ปนอยู่ในแก๊สไอเสียดังภาพที่ 6.17 พบว่าทั้งสามยานการเผาไหม้จะสามารถวัดค่าปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนที่ปนอยู่ในแก๊สไอเสียได้น้อยมาก เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน (N) ที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับถ่านหิน บวกกับชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ ส่งผลให้การเผาไหม้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่ต่ำ เมื่อพิจารณาภาพที่ 3.22 พบว่าถ้าอุณหภูมิของการเผาไหม้ต่ำกว่า 1500 K โอกาสในการเกิด thermal NO_x จะน้อยมาก ดังนั้นจึงอาจจะสรุปได้ว่าออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่วัดค่าได้นั้นมาจาก Fuel NO_x

6.3 การคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง นอกเหนือจากการตรวจวัดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ปนมากับไอเสียแล้ว ยังต้องทำการตรวจวัดปริมาณชาร์ที่ปนมากับเถ้า (char un-burnt) เพื่อคำนวณถึงปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ไม่ได้รับการเผาไหม้ แต่เนื่องจากหัวเผาที่ทำการออกแบบขึ้นนั้น เป็นขนาดที่สามารถนำไปใช้ในหม้อน้ำอุตสาหกรรม ดังนั้นในการทดสอบการเผาไหม้ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จึงไม่สามารถที่จะหยุดการทดสอบเพื่อทำการเก็บตัวอย่างของเถ้าได้ เนื่องจากในการทดสอบแต่ละครั้งต้องใช้ระยะเวลาที่ค่อนข้างนานกว่าที่การเผาไหม้จะเข้าสู่สภาวะคงตัว รวมไปถึงชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่ทำการออกแบบขึ้นมานั้นไม่มีระบบสำหรับการเก็บตัวอย่างเถ้าในลักษณะแห้ง

ดังนั้นในการประเมินประสิทธิภาพการเผาไหม้จึงต้องประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลมาเป็นเครื่องมือในการประเมิน ซึ่งในการจำลองนั้นได้รับความร่วมมือจากคุณนิวัฒน์ สุขสาม ซึ่งเป็นหนึ่งในทีมวิจัย เมื่อพิจารณาภาพที่ 6.19 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคชาร์ระหว่างการเผาไหม้ที่สภาวะการเผาไหม้ 500 kW พบว่าที่บริเวณท่อทางออกของห้องเผาไหม้จะมีอนุภาคชาร์ที่ไม่ได้รับการเผาไหม้ปนไปกับไอเสียประมาณ 10 % ของปริมาณองค์ประกอบชาร์ในเชื้อเพลิง ซึ่งประสิทธิภาพการเผาไหม้มีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้



ภาพที่ 6.19 ทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคชาร์ระหว่างการเผาไหม้

Given : อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 500 kW ($\dot{m}_{fuel}$) = 0.0317 kg / s

Assume : เปอร์เซ็นอนุภาคชาร์ที่ไม่ได้รับการเผาไหม้ (%char unburn) = 10 %

Solutions :

สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_{comb}) จะทำการพิจารณาค่าความร้อนที่สูญเสียไปกับอนุภาคเชื้อเพลิงที่ไม่ได้รับการเผาไหม้ (flue heat losses) ต่อกำลังความร้อนของเชื้อเพลิงที่ป้อนให้กับหัวเผา (fuel heating value) ดังสมการที่ 6.8

$$\text{Combustion Efficiency } (\eta_{comb}) = 100 - \frac{\text{flue heat losses}}{\text{fuel heating value}} \times 100 \quad (6.8)$$

เชื้อเพลิงจะมีปริมาณคาร์บอนองค์ประกอบอยู่ 15.23 % นั่นคือจะมีอัตราการก่อกำเนิดคาร์บอนเท่ากับ 4.828×10^{-3} kg/s ดังนั้นจะมีปริมาณคาร์บอนที่ไม่ได้รับการเผาไหม้เหลืออยู่เท่ากับ

$$\dot{m}_{\text{unburn}} = 4.828 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

ค่าความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้คาร์บอน (heat of reaction for burnout) มีค่าเท่ากับ

$$H_{\text{burnout}} = 32.90 \text{ MJ/kg}$$

คำนวณค่าความร้อนที่สูญเสียไปกับอนุภาคเชื้อเพลิงที่ไม่ได้รับการเผาไหม้

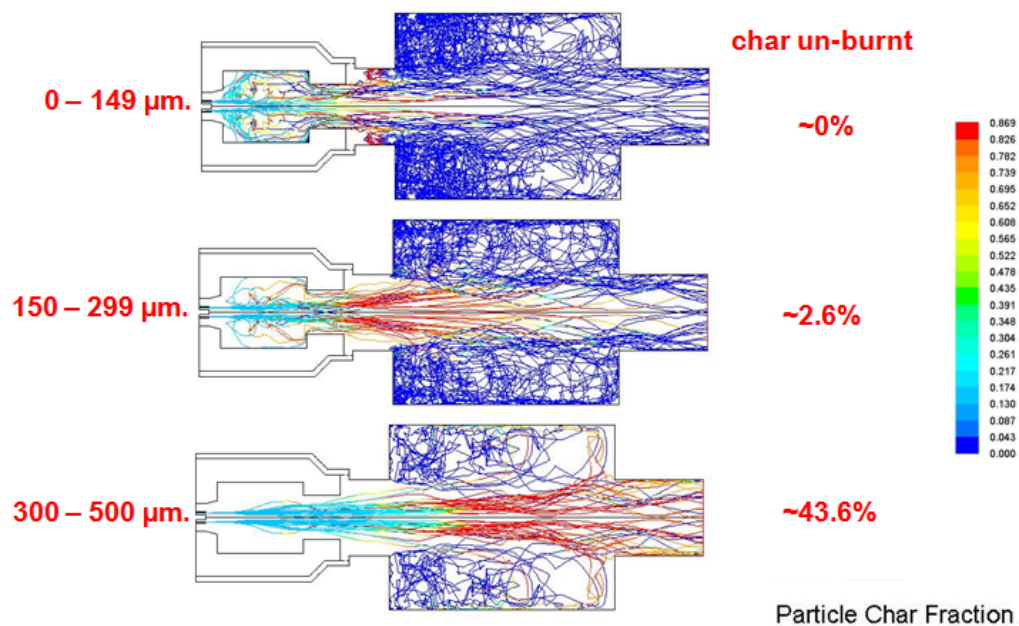
$$\text{flue heat losses} = \dot{m}_{\text{unburn}} \times H_{\text{burnout}} \quad (6.9)$$

$$\text{flue heat losses} = 15.884 \text{ kW}$$

แทนค่า flue heat losses ในสมการที่ 6.9 จะได้

$$\text{Combustion Efficiency } (\eta_{\text{comb}}) = 96.82 \%$$

ซึ่งจากผลการคำนวณจะพบว่า หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ที่ทำการพัฒนานั้นมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_{comb}) ประมาณ 96 %



ภาพที่ 6.20 เปอร์เซนต์คาร์บอนที่ไม่ได้รับการเผาไหม้โดยแยกตามขนาดอนุภาค

เมื่อพิจารณาภาพที่ 6.20 เปอร์เซนต์คาร์บอนที่ไม่ได้รับการเผาไหม้โดยแยกตามขนาดอนุภาค จะช่วยยืนยันได้ว่าอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กการฟุ้งกระจายจะเกิดขึ้นได้ดีภายในห้องเผาไหม้ช่วย และการเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ อนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กกว่า 0.3 mm. จะพบว่าการเผาไหม้จะเกิดขึ้นเกือบจะสมบูรณ์ และเมื่อพิจารณาดารงที่ 6.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงที่ผ่านการบดผ่านรutsche แกรงขนาด 0.5 mm. จะพบว่าอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กกว่า 0.3 mm. จะมีสัดส่วนอยู่ถึง 80.6 % นั่นคือหากเลือกใช้เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 mm. มาเป็นเชื้อเพลิงในการทดสอบ จะมีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 0.3 mm. ซึ่งเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์อยู่เพียงแค่ 19.4 % จึงทำให้โดยรวมแล้วจะเปอร์เซนต์คาร์บอนที่ไม่ได้รับการเผาไหม้เพียง 10 % และให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_{comb}) ประมาณ 96 %

6.4 การประมาณอัตราการระเหยของน้ำในหม้อน้ำ

เนื่องจากในการทดสอบสมรรถนะการเผาไหม้ของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงนั้น เป็นเพียงการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งยังไม่ได้ถูกนำไปใช้งานจริงในหม้อน้ำอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงต้องทำการประมาณถึงความสามารถของการนำแก๊สร้อนไปใช้สำหรับการผลิตไอน้ำในหม้อน้ำ ด้วยการคำนวณอัตราในการผลิตไอน้ำสำหรับการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 500 kW ซึ่งเป็นกำลังความร้อนสูงสุดที่หัวเผาสามารถทำการเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

Given : กำลังการผลิตของหัวเผา (burner capacity) $\dot{Q}_{in} = 500 \text{ kW}$

Assume : ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (combustion efficiency) $\eta_{comb} = 95\%$

ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน (heat transfer efficiency) $\eta_{heat} = 80\%$

ความดันใช้งานของหม้อน้ำ $P_{boiler} = 10 \text{ bar}$

Solutions :

อุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวที่ความดัน 10 bar

$$T_{sat@10bar} = 179.89 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในหม้อน้ำ

$$Q_{ex} = Q_{in} \times (\eta_{comb}/100) \times (\eta_{heat}/100) \quad (6.10)$$

จะได้

$$Q_{ex} = 380 \text{ kW}$$

คำนวณหาค่า The enthalpy of vaporization

$$h_{fg} = h_g - h_f$$

โดยที่ h_f คือ Saturated liquid enthalpy และ h_g คือ Saturated vapor enthalpy ซึ่งที่ความดัน 10 bar จะพบว่า

$$h_{f@10bar} = 42.02 \text{ kJ/kg} \text{ และ } h_{g@10bar} = 2777.12 \text{ kJ/kg}$$

จะได้
$$h_{fg} = 2735.10 \text{ kJ/kg}$$

คำนวณอัตราการระเหยของน้ำ

$$m_{evap} = Q_{ex} / h_{fg} \quad (6.11)$$

จะได้
$$m_{evap} = 0.14 \text{ kg / s}$$

หรือ
$$m_{evap} = 504 \text{ kg / hr}$$

สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำอ้างอิงจากโปรแกรม XSteam Excel v2.6 ซึ่งจากผลการคำนวณจะพบว่า หัวเผาที่มีกำลังความร้อนจากการเผาไหม้ 500 kW สามารถที่จะนำไปใช้ผลิตไอน้ำในหม้อน้ำได้ในอัตรา 0.5 ตันต่อชั่วโมง ที่ความดันไอน้ำ 10 bar

บทที่ 7

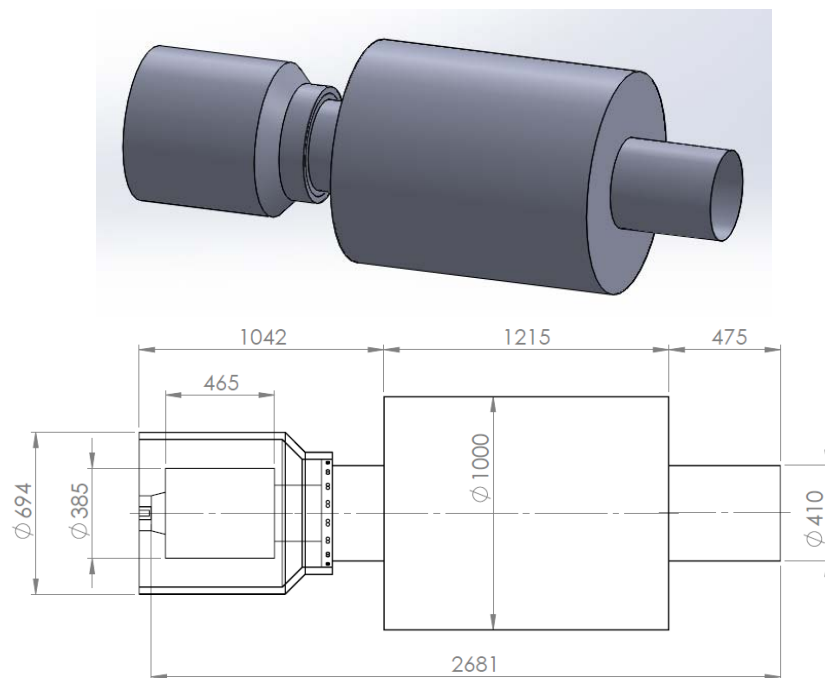
การจำลองเชิงตัวเลขการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผง

7.1 ระเบียบวิธีการคำนวณ

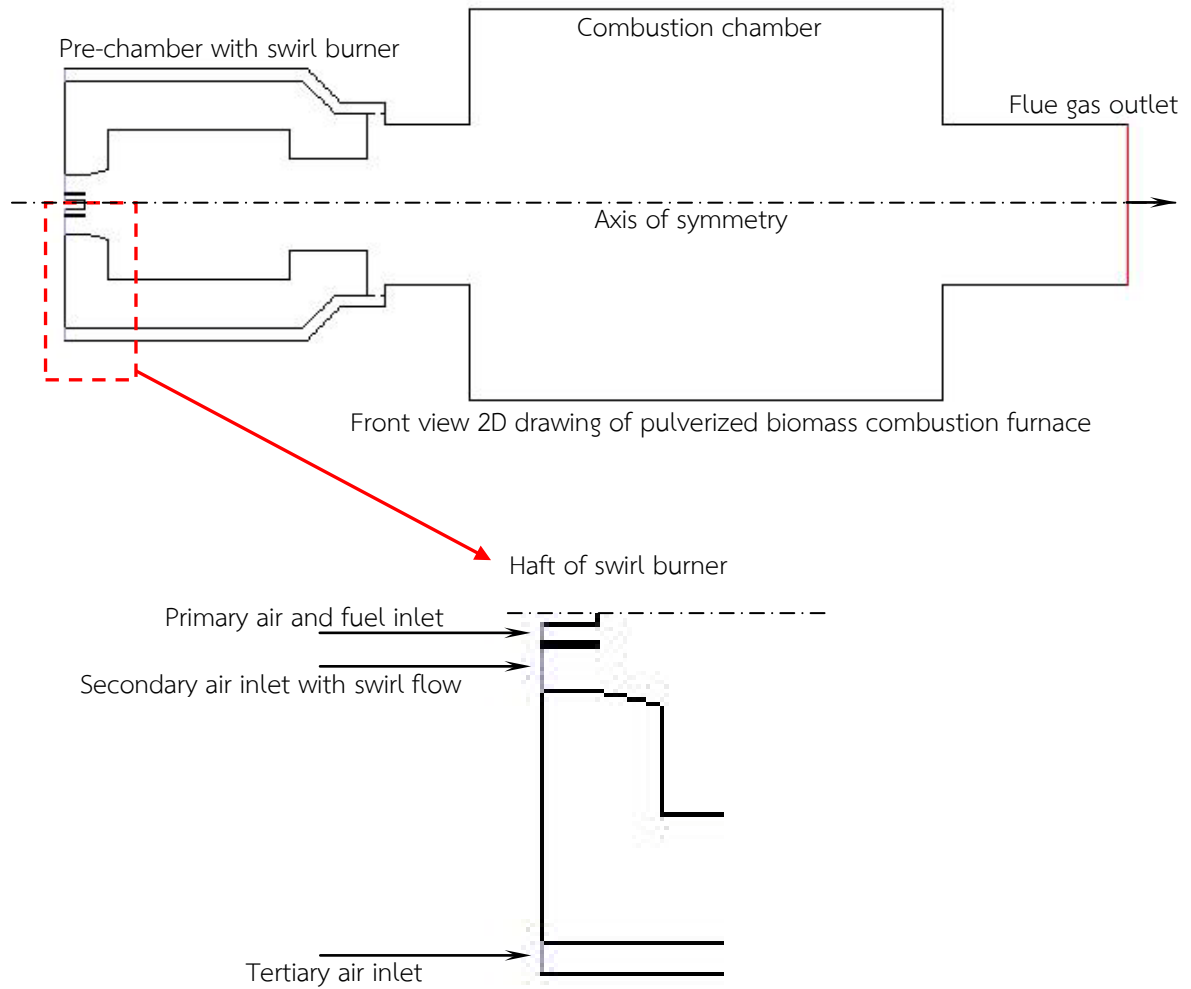
โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ใช้คือโปรแกรม ANSYS Fluent ซึ่งเป็นระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม โดยเลือกใช้ SIMPLE สำหรับ pressure-velocity coupling ใช้ least squares cell base สำหรับเกรเดียนท์ ใช้ second order สำหรับสมการความดัน และใช้ second order upwind สำหรับสมการที่เหลือคือ สมการความหนาแน่น สมการโมเมนตัม สมการความเร็วของการไหลหมุนควง สมการแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน turbulent kinetic energy และ turbulent dissipation rate สมการองค์ประกอบต่าง ๆ ของแก๊ส สมการพลังงาน และสมการการแผ่รังสีความร้อนแบบ discrete ordinates (DO)

7.2 ขอบเขตและสถานะเงื่อนไขการจำลองของหัวเผาชีวมวลผงที่มีการไหลหมุนควง

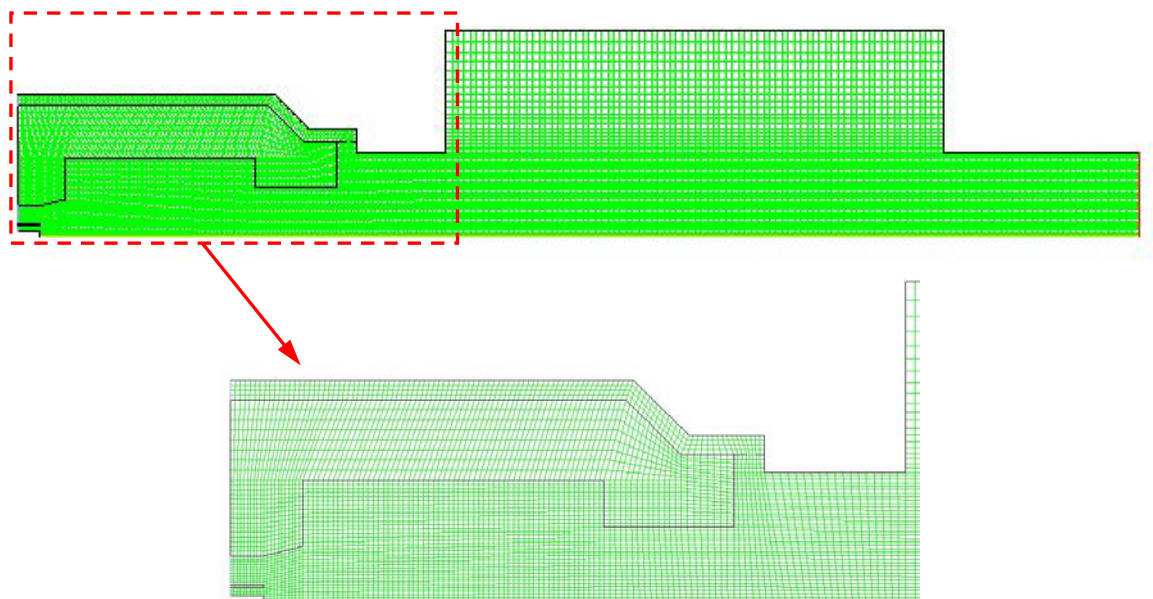
เตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงแสดงในภาพที่ 7.1 และ 7.2 แบบจำลองของเตานั้นเป็นแบบ 2 มิติ เพียงครึ่งเดียวจากแกนกลาง เนื่องจากพิจารณาให้มีความสมมาตรรอบแกนกลางเตา และกริดที่ใช้เป็นแบบสี่เหลี่ยมดังแสดงในภาพที่ 7.3 สำหรับตำแหน่งภายในเตาที่ทำการวัดอุณหภูมิการเผาไหม้ในการทดลองแสดงในภาพที่ 7.4 สำหรับการทดสอบขนาดของกริดที่เพียงพอในการคำนวณแสดงในภาพที่ 7.5 และ 7.6 ขนาดของกริดที่เพียงพอต่อการคำนวณมีขนาด 11,568 เซลล์ สถานะการทำงานของเตาแสดงในตารางที่ 1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ใช้ในการเผาไหม้แสดงในตารางที่ 2 และการกระจายขนาดของอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลผงแสดงในตารางที่ 3



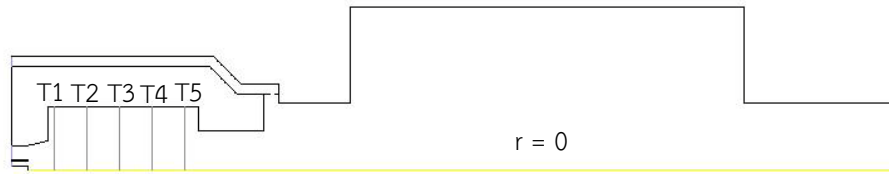
ภาพที่ 7.1 ภาพในมุมมองไดเมตริกและขนาด (mm) ของเตาเผาไหม้ชีวมวลผง



ภาพที่ 7.2 แผนภาพแสดงลักษณะและส่วนต่าง ๆ ของเตาเผาไหม้ชีวมวลผง



ภาพที่ 7.3 ขอบเขตของการคำนวณและกริดของเตาเผาไหม้ชีวมวลผงที่ใช้ในการคำนวณ



T1=x=0.082 m, T2=x=0.182 m, T3=x=0.282 m, T4=x=0.382 m และ T5=x=0.482 m ระยะจากทางออกของหัวเผา

ภาพที่ 7.4 แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตา ที่ตามแนวรัศมี (T1, T2, T3, T4 และ T5) และตามแนวแกน (r=0)

ตารางที่ 7.1 สภาวะการทำงานของเตา

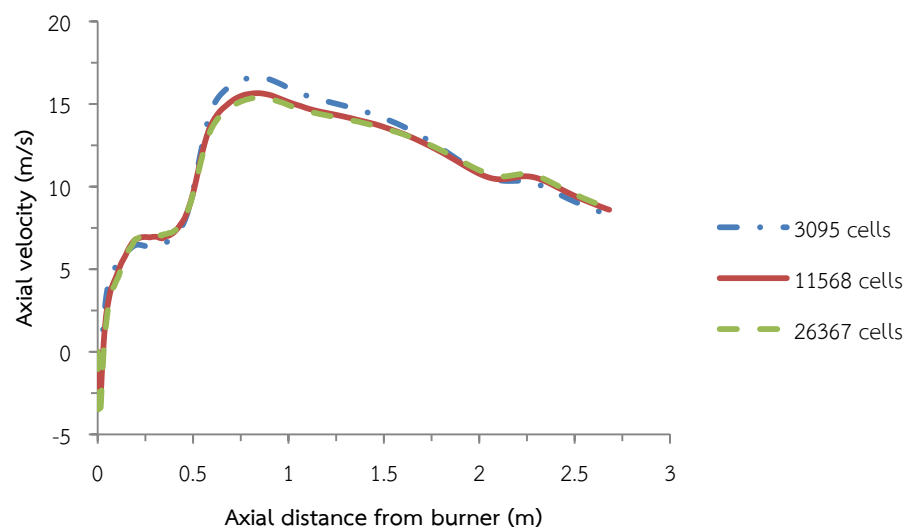
Pulverized biomass feed rate at primary inlet (kg/s)	0.0317
Primary air flow (kg/s)	0.0223
Secondary air flow (kg/s)	0.1449
Swirl number of secondary air flow	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2
Tertiary air flow (kg/s)	0.0557
Mole fraction of O ₂ in air inlet	0.21
Mole fraction of N ₂ in air inlet	0.79
Temperature of pulverized biomass inlet (K)	313
Temperature of primary, secondary and tertiary air inlet (K)	313
Temperature of combustion chamber wall (K)	773
Internal emissivity of combustion chamber wall (K)	0.75
Outlet pressure of flue gas (Pa)	-1500
Gravitational acceleration (m/s ²)	9.81
Operating pressure (Pa)	101325
Operating temperature (K)	313

ตารางที่ 7.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

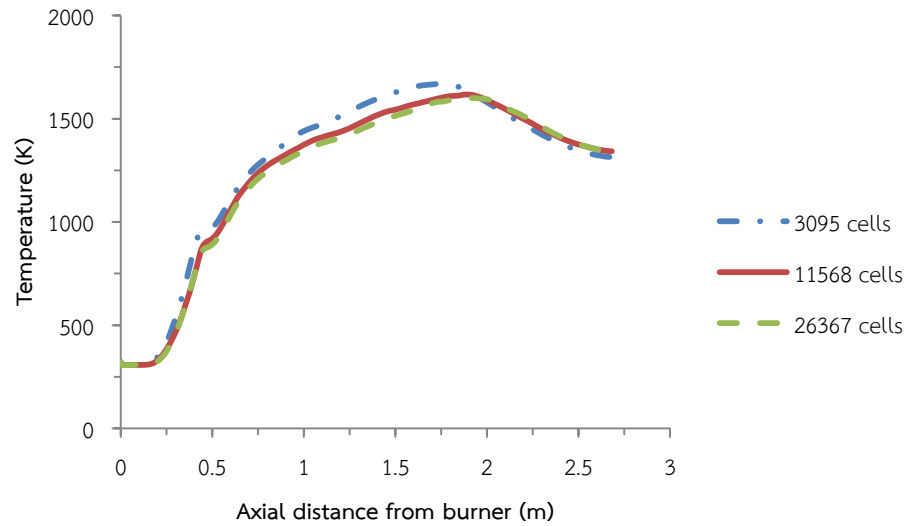
Proximate analysis (wt.%, as received)				
Ash	Volatile matter	Moisture	Fixed carbon	
2.28	76.68	5.81	15.23	
Ultimate analysis (wt.% Dry-Ash-Free)				
C	H	O	N	S
49.42	6.16	43.93	0.49	0
Higher heating value (HHV) 17500 kJ/kg				
Lower heating value (LHV) 16161 kJ/kg				

ตารางที่ 7.3 การกระจายขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงผง

Particle size (μm)	% Weight
500	2.6
362.5	16.8
240	25.5
165	12.6
112.5	18.1
37.5	24.4



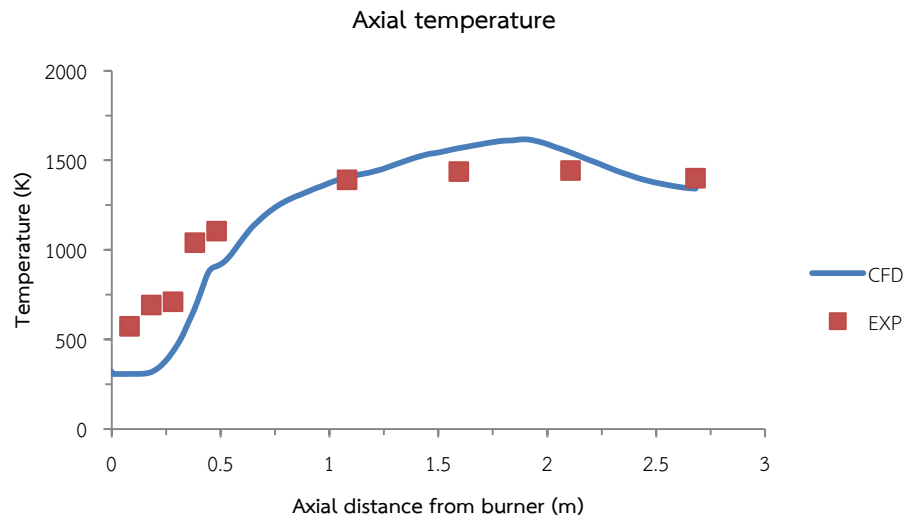
ภาพที่ 7.5 ความเร็วตามแนวแกนกลางของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ที่แต่ละขนาดกริด



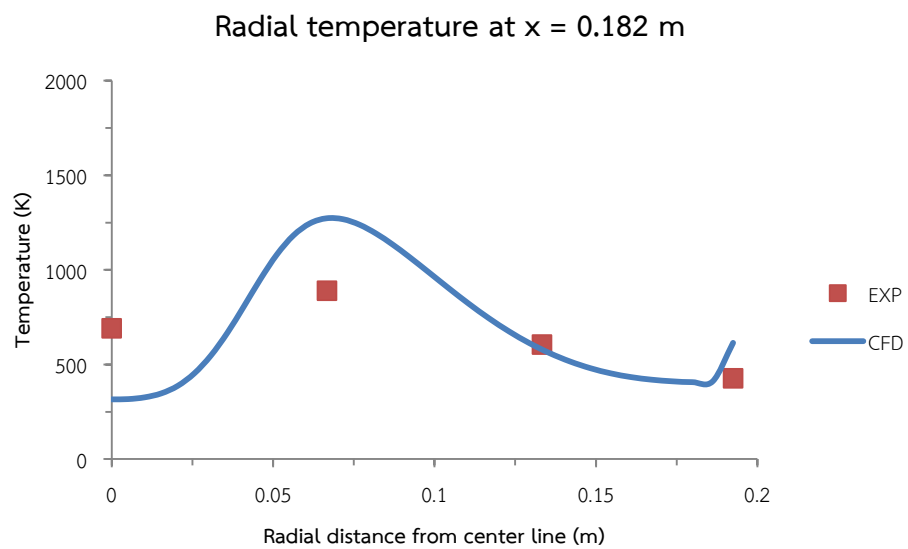
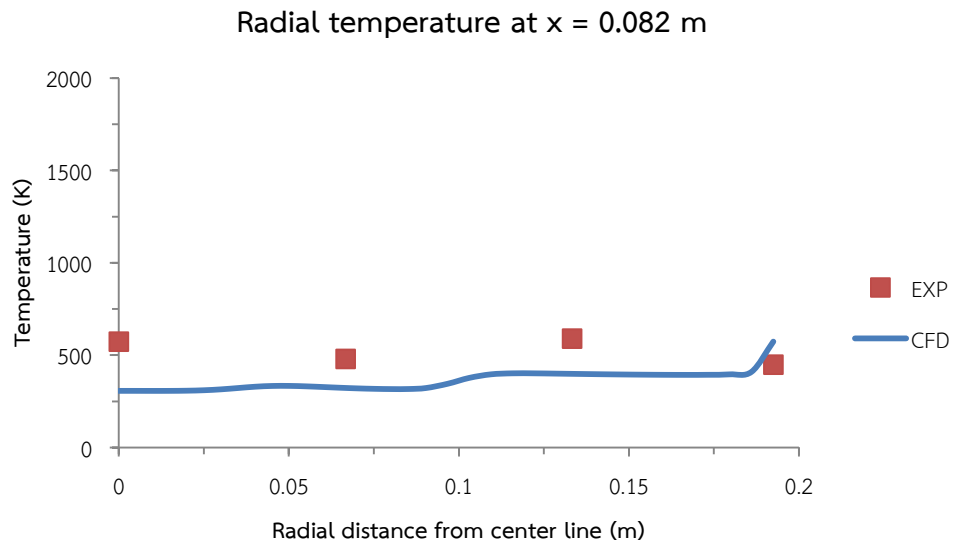
ภาพที่ 7.6 อุณหภูมิตามแนวแกนกลางของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ที่แต่ละขนาดกริด

7.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

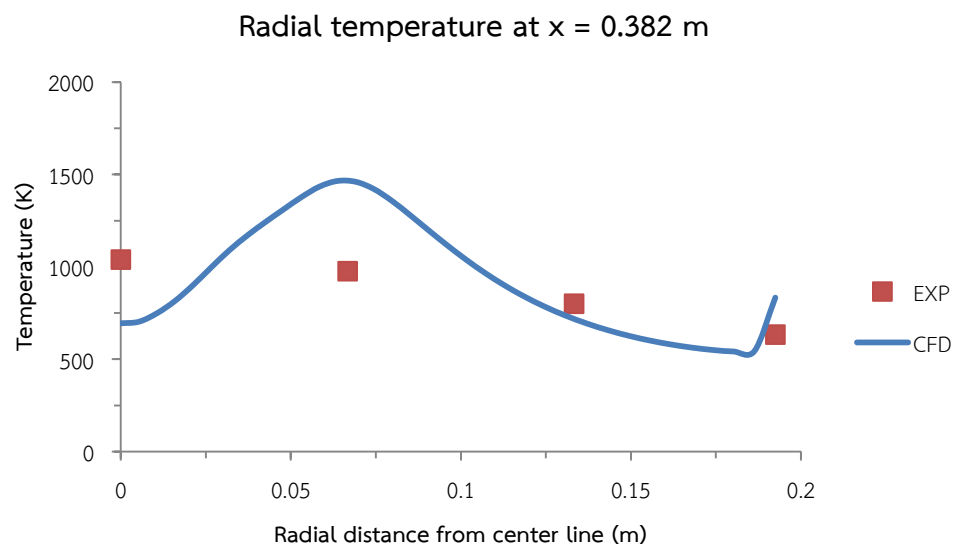
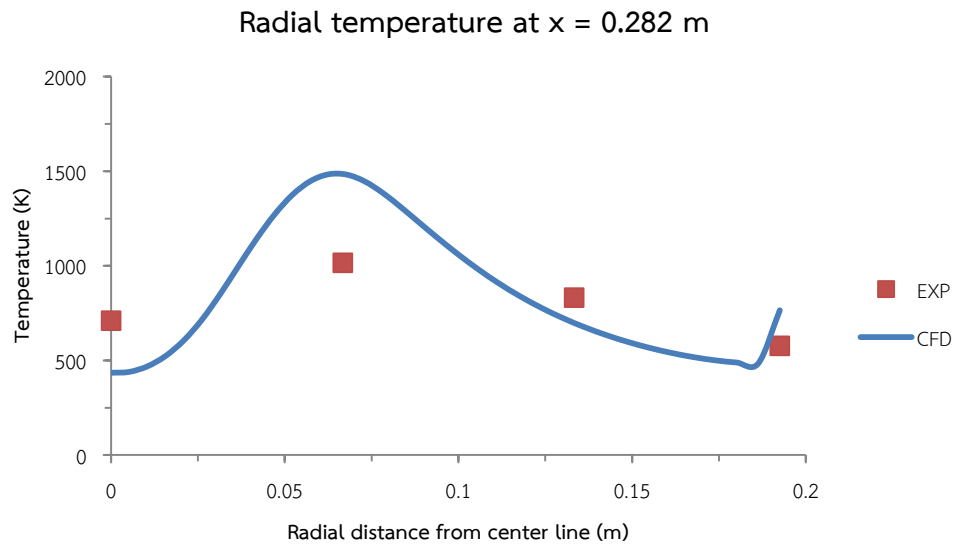
เพื่อให้การจำลองมีความถูกต้องเชื่อถือได้ จึงได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลขโดยเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิจากแบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในภาพที่ 7.7-7.10



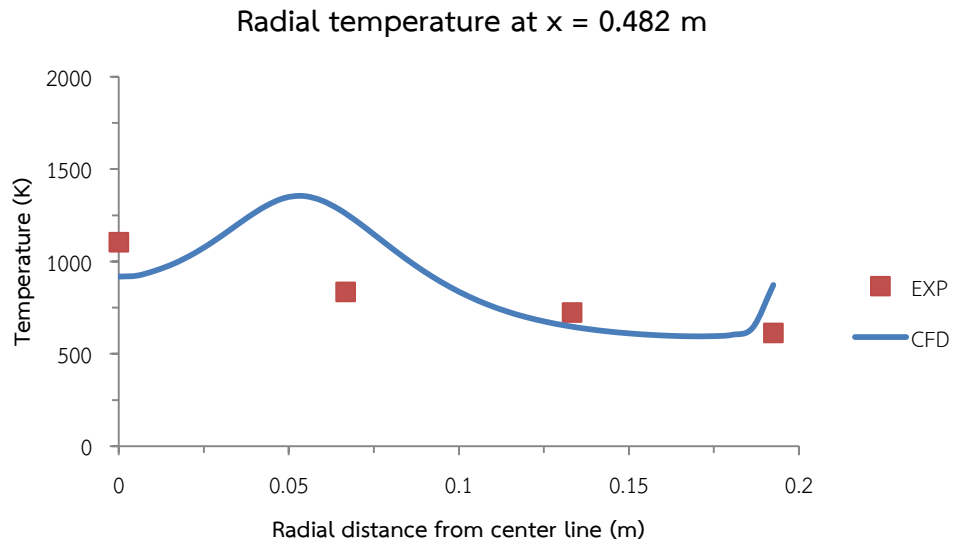
ภาพที่ 7.7 เปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนกลางของเตาเผาไหม้ชีวมวลผงระหว่าง CFD กับการทดลอง



ภาพที่ 7.8 เปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวเส้นรัศมีของห้องเผาไหม้ช่วยระหว่าง CFD กับการทดลอง ภาพบนที่ตำแหน่ง $x=0.082$ m และภาพล่างที่ตำแหน่ง $x=0.182$ m



ภาพที่ 7.9 เปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวเส้นรัศมีของห้องเผาไหม้ช่วยระหว่าง CFD กับการทดลอง ภาพบนที่ตำแหน่ง $x=0.282$ m และภาพล่างที่ตำแหน่ง $x=0.382$ m



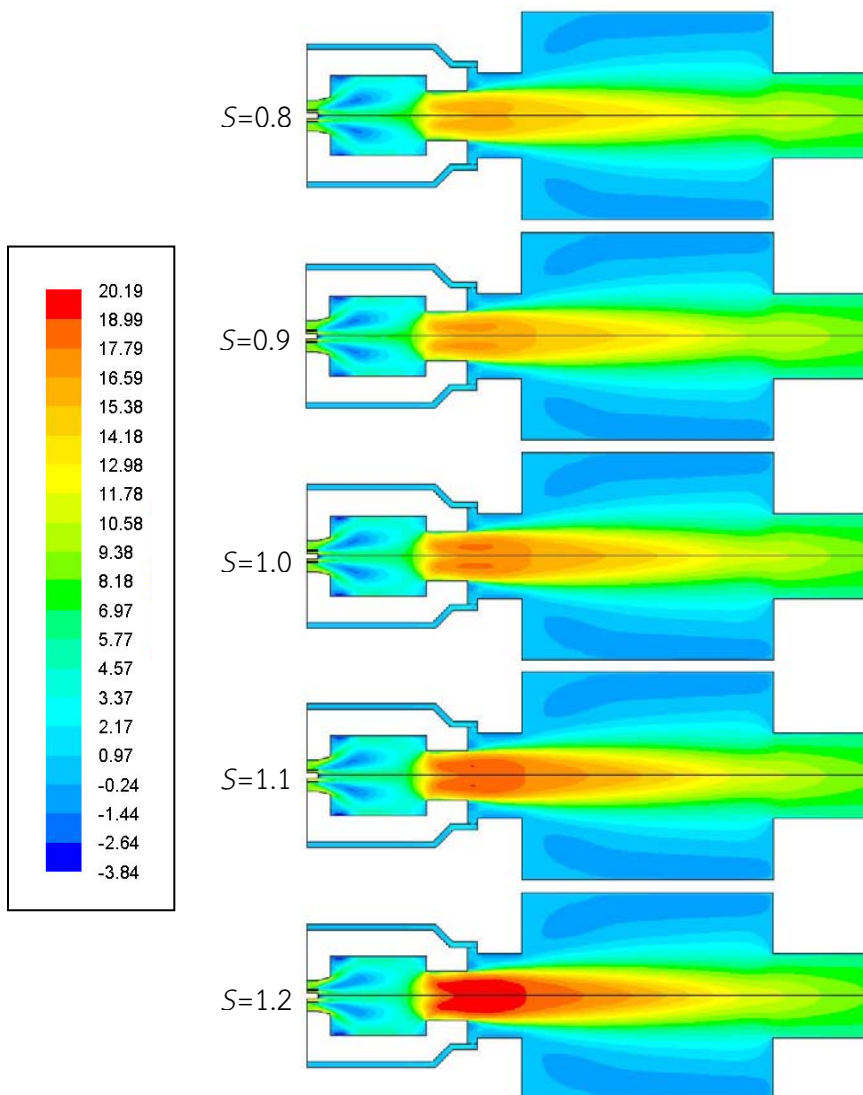
ภาพที่ 7.10 เปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวเส้นรัศมีของห้องเผาไหม้ช่วยระหว่าง CFD กับการทดลอง ที่ตำแหน่ง $x=0.482$ m

7.4 ผลการจำลองและการอภิปรายผล

ส่วนนี้จะเป็นการอภิปรายผลการจำลองเชิงตัวเลขของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่เกิดขึ้นในเตา ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวเลขการไหลหมุนควงจาก 0.8 ถึง 1.2

7.4.1 ความเร็วตามแนวแกน

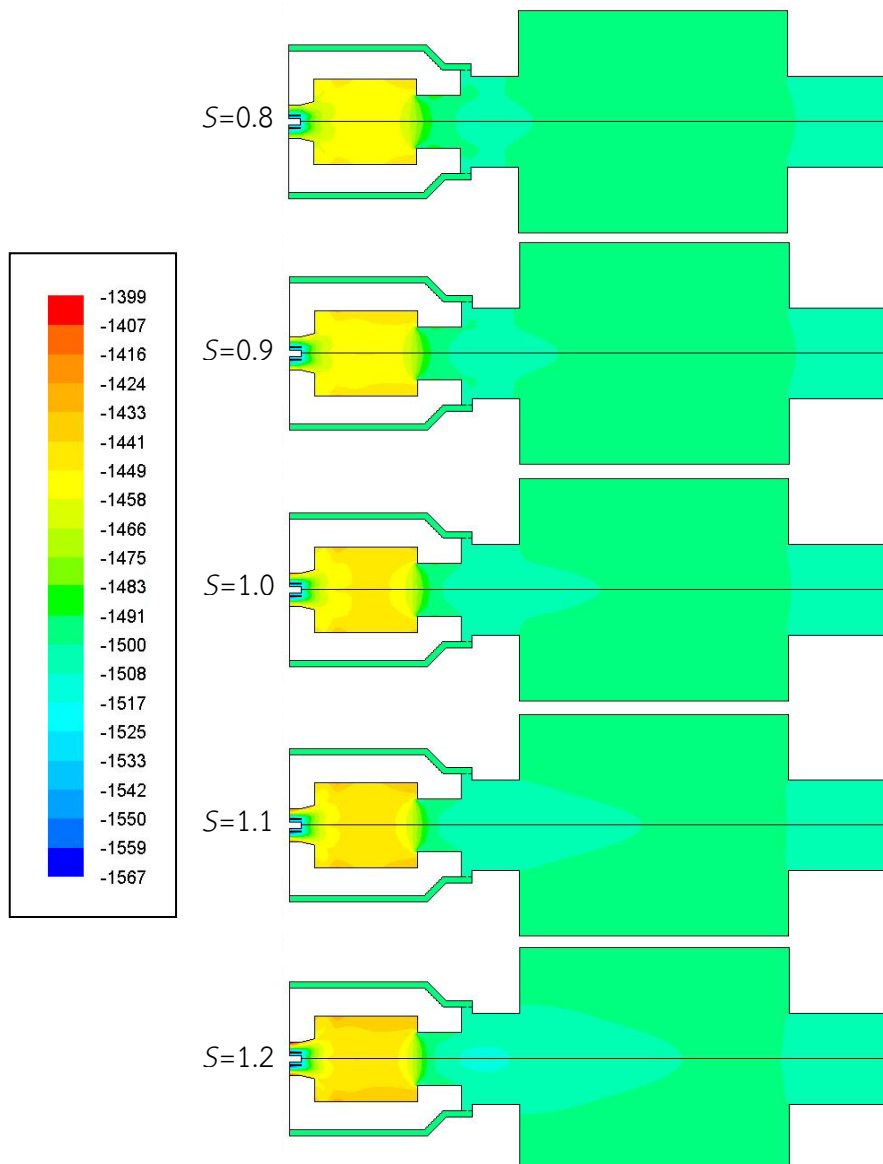
ภาพที่ 7.11 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความเร็วตามแนวแกนที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง เมื่อตัวเลขการไหลหมุนควงเพิ่มขึ้นความเร็วตามแนวแกนจะเพิ่มขึ้น ความเร็วสูงเกิดขึ้นที่ทางออกจากห้องเผาไหม้ช่วยและไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ใหญ่ โดยเฉพาะที่ $S=1.2$ การไหลหมุนควงที่ทางเข้าของหัวเผาช่วยให้เกิดการไหลหมุนวนภายในห้องเผาไหม้ช่วย การเพิ่มขึ้นของความเร็วตามแนวแกนเมื่อตัวเลขการไหลหมุนควงเพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้โดยเกิดจากการผสมกันได้ดีขึ้นของเชื้อเพลิงกับอากาศซึ่งทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ที่สูง ส่งผลให้ความหนาแน่นของแก๊สต่ำลง ความเร็วของแก๊สจึงต้องสูงขึ้นเพื่อให้ได้อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สเท่าเดิม



ภาพที่ 7.11 การกระจายความเร็วตามแนวแกน (m/s) ภายในเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง

7.4.2 การกระจายความดัน

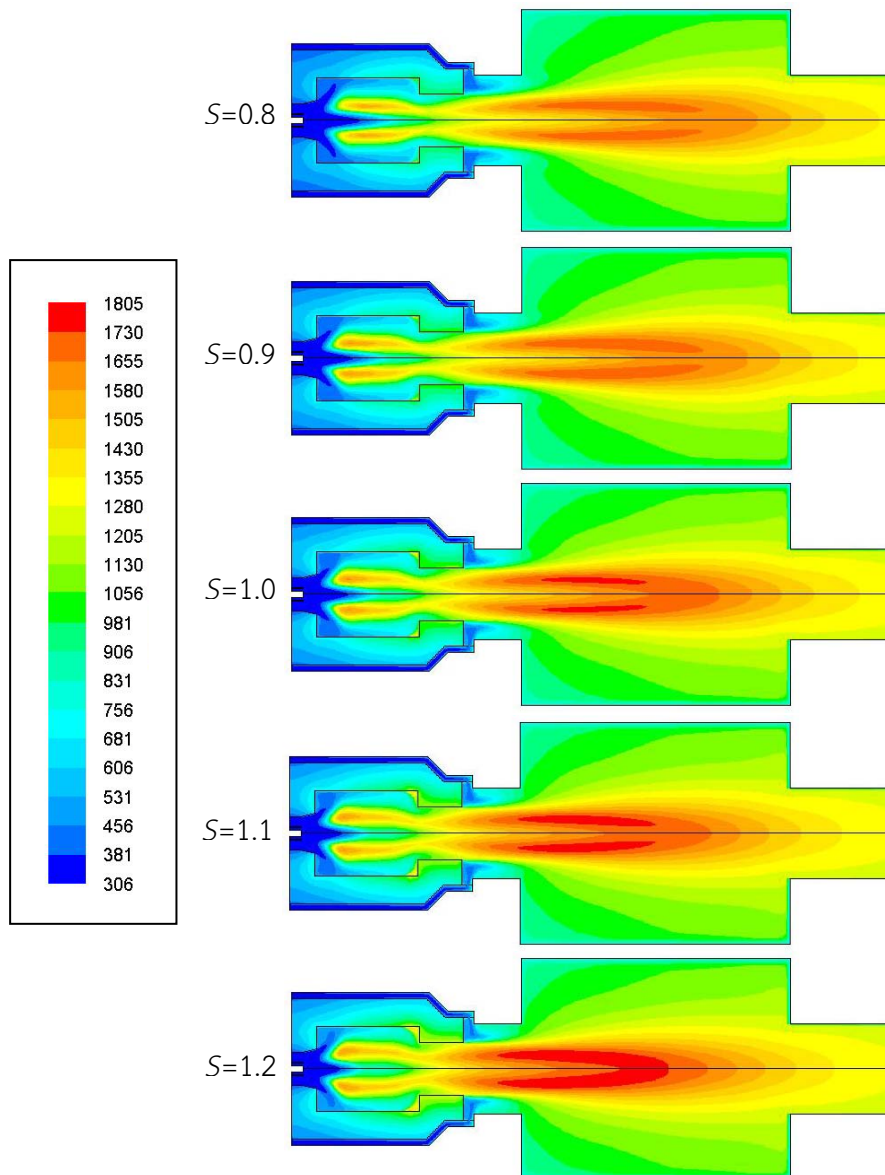
ภาพที่ 7.12 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันภายในเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง เมื่อตัวเลขการไหลหมุนควงเพิ่มขึ้น ความดันที่ห้องเผาไหม้ช่วยก็เพิ่มขึ้นตาม การกระจายความดันที่ข้อต่อระหว่างห้องเผาไหม้ช่วยกับห้องเผาไหม้หลักจะมีพื้นที่ที่มีความดันต่ำเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของความดันที่แตกต่างกันเมื่อตัวเลขการไหลหมุนควงเพิ่มขึ้นสามารถอธิบายโดยเมื่อตัวเลขการไหลหมุนควงสูงขึ้น จะต้องการความดันที่ทางเข้าของหัวเผาเพื่อสร้างการไหลหมุนควงที่รุนแรงขึ้นที่อัตราการไหลเท่ากัน



ภาพที่ 7.12 การกระจายความดัน (Pa) ภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง

7.4.3 การกระจายอุณหภูมิ

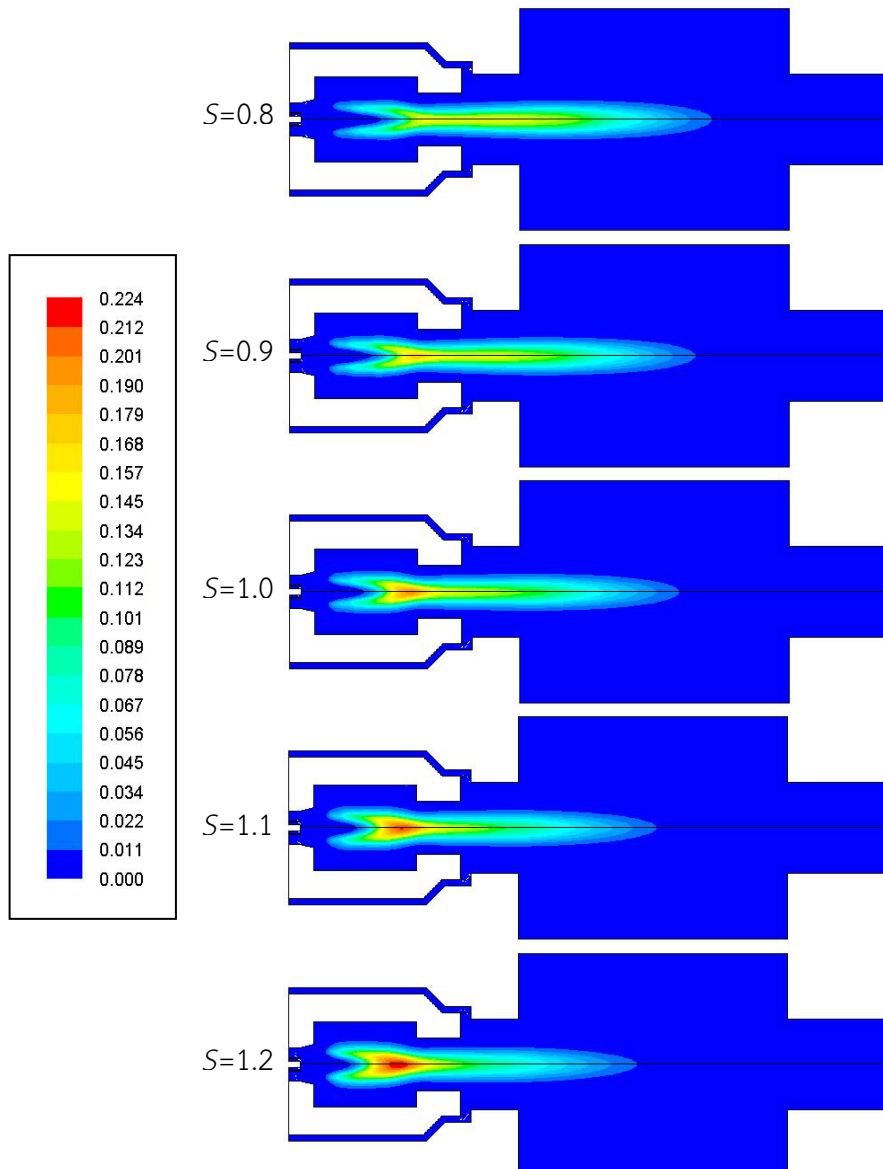
ภาพที่ 7.13 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง เมื่อตัวเลขการไหลหมุนควงเพิ่มขึ้นจาก 0.8 ถึง 1.2 ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงจะเคลื่อนเข้าสู่ทางออกของหัวเผา โดยเฉพาะที่แกนกลางของเตา อุณหภูมิของการเผาไหม้ก็เพิ่มขึ้นด้วย การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสามารถอธิบายโดยการไหลหมุนควงที่รุนแรงขึ้นนำไปสู่การผสมคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่เร็วขึ้น การเผาไหม้ที่รวดเร็วจึงเกิดขึ้นที่ใกล้กับทางออกของหัวเผา



ภาพที่ 7.13 การกระจายอุณหภูมิ (K) ภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง

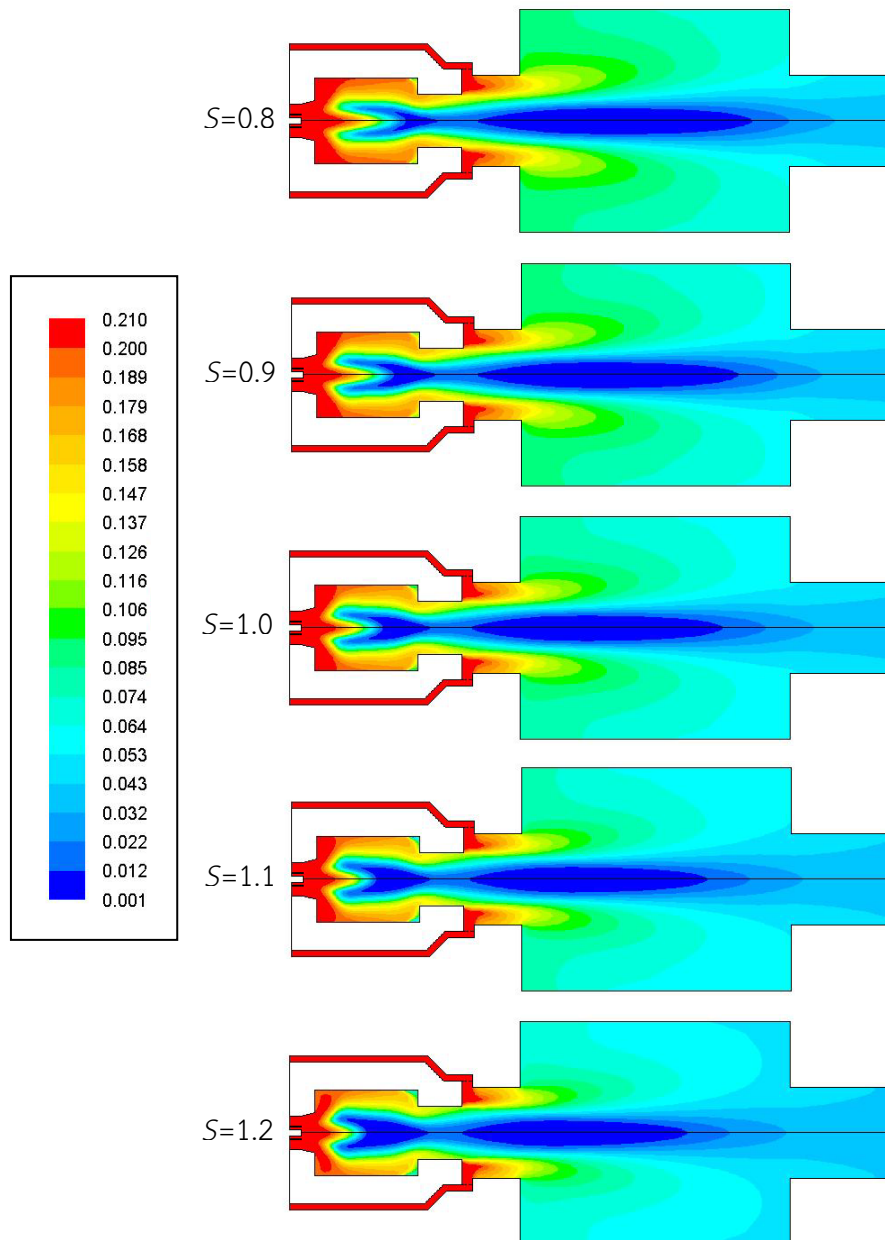
7.4.4 การกระจายตัวองค์ประกอบของแก๊ส

ภาพที่ 7.14 แสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารระเหยภายในเตาที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง เมื่อตัวเลขการไหลหมุนควง เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของสารระเหยก็เพิ่มขึ้นด้วยและพื้นที่ของการกระจายตัวก็เพิ่มขึ้นด้วย และเคลื่อนที่เข้าสู่ทางออกของหัวเผา โดยเฉพาะที่บริเวณแกนกลางของเตา การเพิ่มขึ้นของสารระเหยสามารถอธิบายโดยเมื่อตัวเลขการไหลหมุนควงเพิ่มขึ้นนั้นจะช่วยเพิ่มขนาดความเร็วของการไหลซึ่งนำไปสู่การผสมที่สูงขึ้นระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ อิทธิพลนี้ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสารระเหยในอัตราที่สูงขึ้น



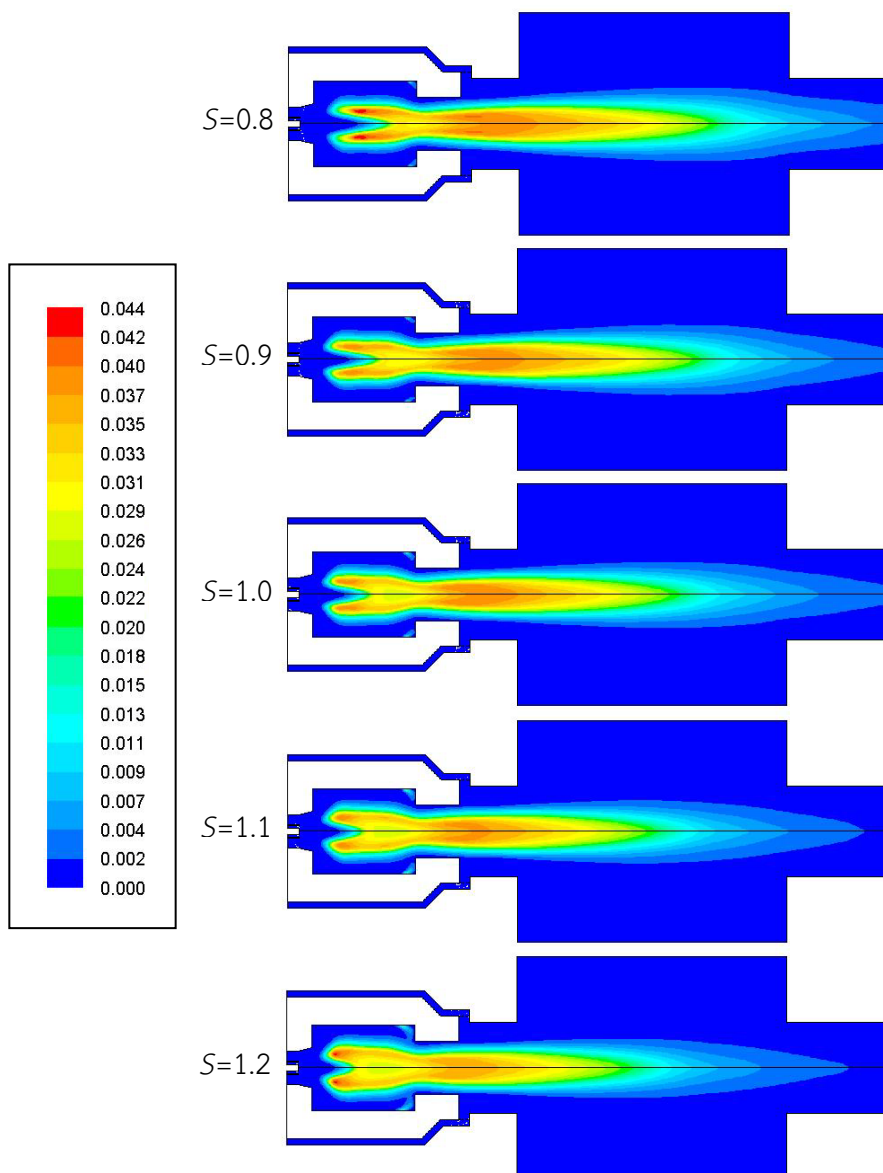
ภาพที่ 7.14 สัดส่วนเชิงโมลของสารระเหยภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง

ภาพที่ 7.15 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายออกซิเจนภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง เมื่อตัวเลขการไหลหมุนควงเพิ่มขึ้น การใช้ออกซิเจนในการเผาไหม้ก็จะเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของออกซิเจนในห้องเผาไหม้ช่วยลดลง การใช้ออกซิเจนที่รวดเร็วขึ้นนี้สามารถอธิบายโดยการไหลหมุนควงที่สูงขึ้นนั้นนำไปสู่การผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงและนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ดีและเร็วขึ้นซึ่งเป็นเหตุให้ใช้ออกซิเจนเพิ่มขึ้น



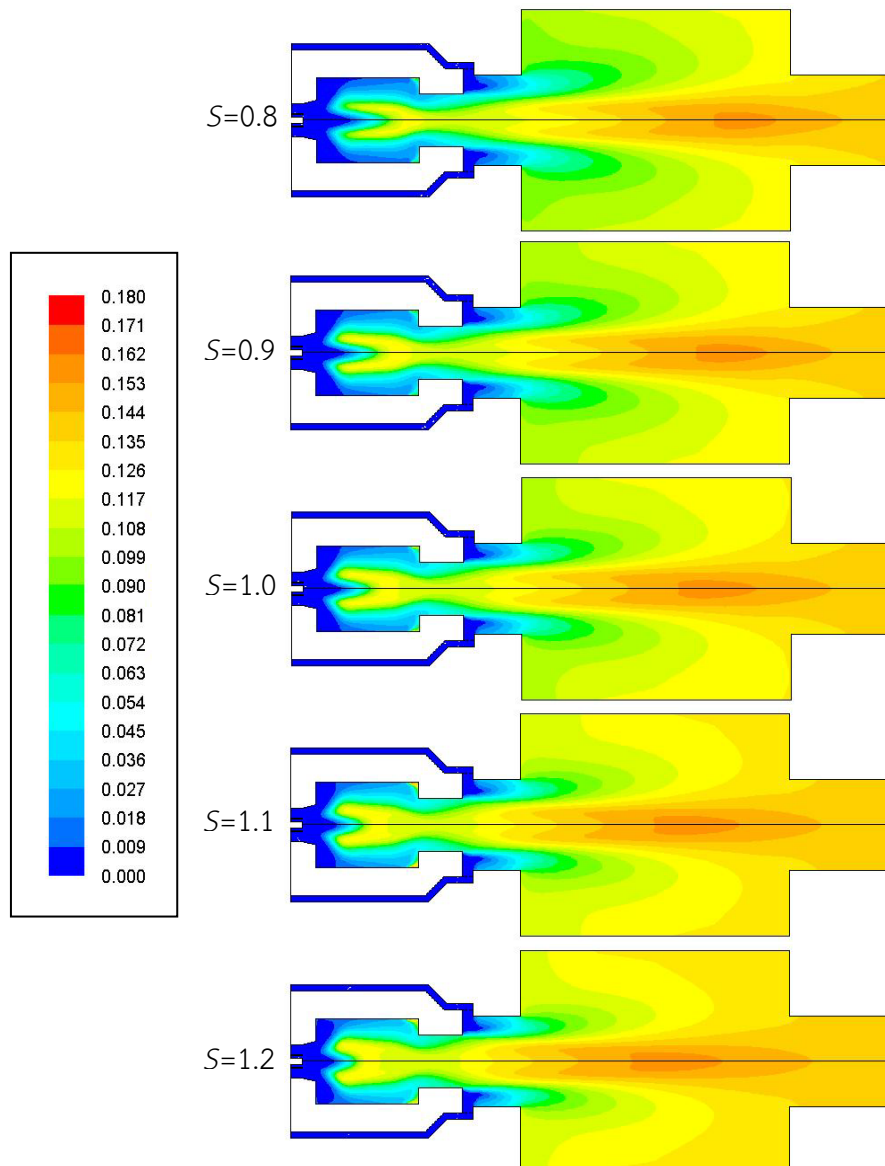
ภาพที่ 7.15 สัดส่วนเชิงโมลของออกซิเจนภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง

ภาพที่ 7.16 แสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ ภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง ที่ตัวเลขการไหลหมุนควงเท่ากับ 0.8, 0.9 และ 1.0 คาร์บอนมอนอกไซด์ไม่สามารถเผาไหม้ได้สมบูรณ์ภายในห้องเผาไหม้ คาร์บอนมอนอกไซด์ยังคงเหลือและไหลออกจากห้องเผาไหม้ผ่านทางออกของแก๊สไอเสีย เมื่อตัวเลขการไหลหมุนควงเพิ่มขึ้น คาร์บอนมอนอกไซด์เผาไหม้ได้หมด ดังนั้นการไหลหมุนควงที่สูงขึ้นส่งผลให้มีอัตราการการบริโภคที่สูงขึ้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ตัวเลขการไหลหมุนควงเท่ากับ 1.1 และ 1.2 คาร์บอนมอนอกไซด์สามารถเผาไหม้ได้สมบูรณ์ การเผาไหม้คาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงขึ้นนี้สามารถอธิบายโดยใช้เหตุผลเดียวกับที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้



ภาพที่ 7.16 สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์ภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง

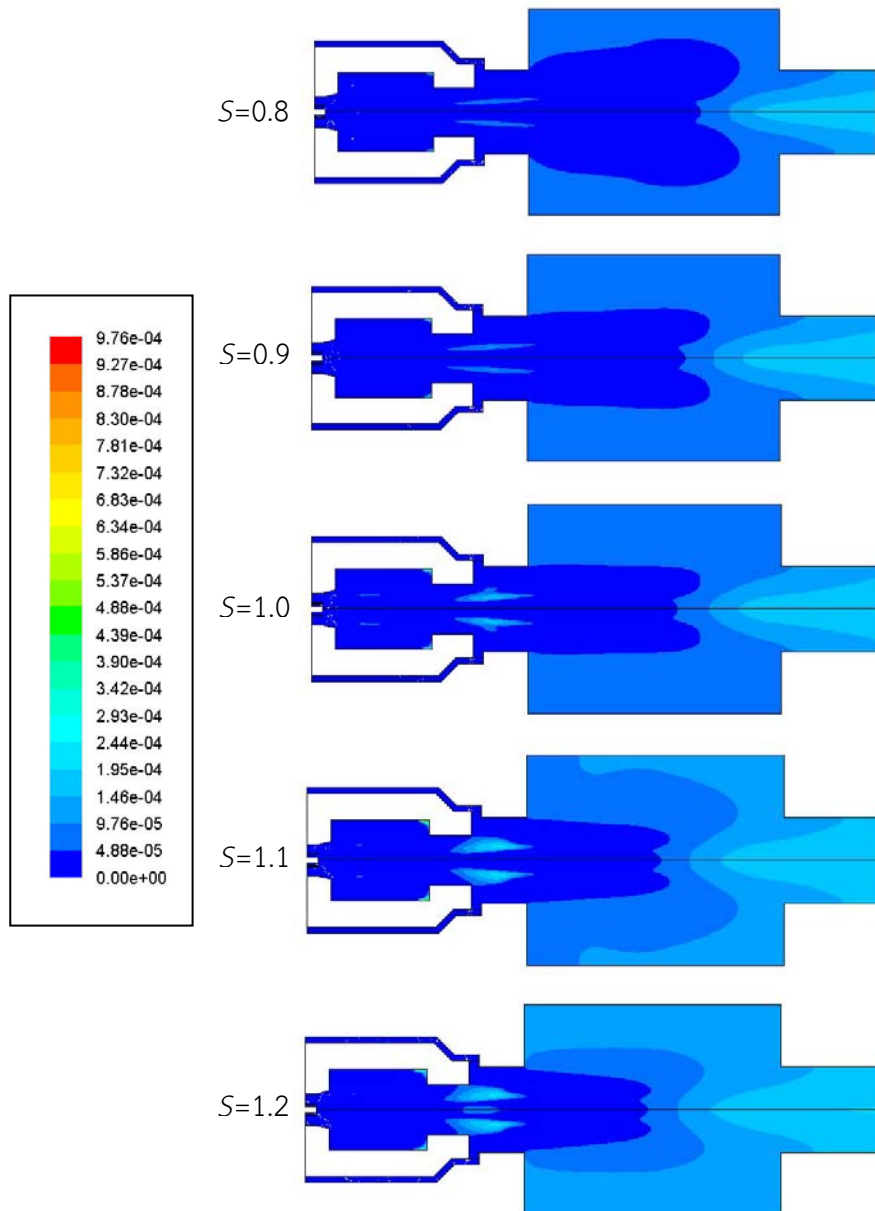
ภาพที่ 7.17 แสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง เมื่อตัวเลขการไหลหมุนควงเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มีพื้นที่การกระจายตัวสูงขึ้นที่บริเวณทางออก การกระจายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์สามารถอธิบายโดยการไหลหมุนควงที่รุนแรงนำไปสู่การเผาไหม้อย่างรวดเร็ว ทำให้ก่อเกิดคาร์บอนไดออกไซด์เร็วขึ้นและไหลไปยังบริเวณทางออก



ภาพที่ 7.17 สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง

7.4.5 การก่อเกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x formation)

ภาพที่ 7.18 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของไนโตรเจนออกไซด์ภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง เมื่อตัวเลขการไหลหมุนควงเพิ่มขึ้นจาก 0.8 จนถึง 1.2 ความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้นตามตัวเลขการไหลหมุนควง การเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนออกไซด์สามารถอธิบายโดยตัวเลขการไหลหมุนควงเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิจากการเผาไหม้สูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอัตราการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ และเป็นสาเหตุให้ก่อเกิดไนโตรเจนออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่ตัวเลขการไหลหมุนควงเท่ากับ 1.2 มีค่าสูงสุด



ภาพที่ 7.18 สัดส่วนเชิงโมลของไนโตรเจนออกไซด์ภายในเตาเผาไหม้ที่แต่ละตัวเลขการไหลหมุนควง

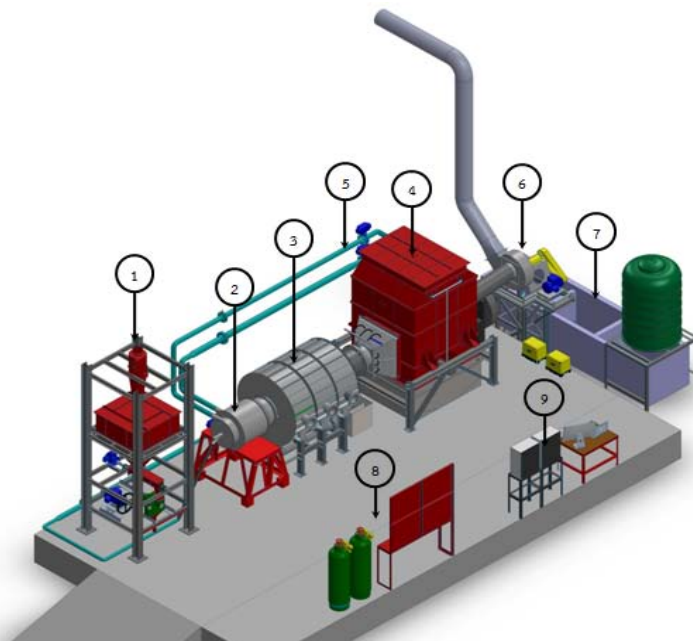
บทที่ 8

สรุป และข้อเสนอแนะ

8.1 บทสรุป

การออกแบบ และพัฒนาต้นแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ขนาด 1 MW ได้มีการนำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการเผาไหม้ ที่ผ่านการจำลองเทียบเคียงกับเตาเผาเชื้อเพลิงถ่านหินผง มาประยุกต์ใช้กับการจำลองเพื่อออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงดังกล่าว จากผลการจำลองพบว่าหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วยที่มีมุมผนังบริเวณทางออกเท่ากับ 90 องศา สามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ โดยไม่เกิดปรากฏการเป่าดับ [3] เมื่อทำการจำลองเพื่อหาขนาดการทำงานที่เหมาะสมสำหรับหัวเผาที่ทำการศึกษา จากผลการจำลองพบว่าหัวเผานี้มีขนาดการทำงานอยู่ระหว่าง 450 kW ถึง 1 MW ซึ่งจะเป็นช่วงที่หัวเผาสามารถรักษาเสถียรภาพในการเผาไหม้ และให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จากข้อมูลดังกล่าวจึงนำไปสู่การผลิตต้นแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง

นอกเหนือจากต้นแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงแล้ว เพื่อให้งานวิจัยสามารถดำเนินการต่อได้ จึงต้องทำการออกแบบระบบสนับสนุนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ซึ่งได้แก่ระบบป้อนเชื้อเพลิง ห้องเผาไหม้ และระบบบำบัดไอเสีย เป็นต้น โดยในการออกแบบจะถูกจำกัดขอบเขตด้วยกำลังความร้อนสูงสุดของหัวเผาที่ 1 MW ซึ่งผลลัพธ์ของการออกแบบจะทำให้ได้ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงดังแสดงในรูปที่ 7.1



รูปที่ 8.1 ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง (1) ระบบป้อน และป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง, (2) หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล, (3) ห้องเผาไหม้, (4) ระบบบำบัดไอเสีย wet scrubber, (5) ระบบป้อนอากาศ, (6) พัดลมดูดอากาศ และปล่องควัน, (7) บ่อตกตะกอน และระบบหมุนเวียนน้ำ, (8) ชุดควบคุมแก๊ส LPG, (9) ระบบวัด และควบคุม

สำหรับการทดสอบสมรรถนะของชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง นอกเหนือจากการทดสอบสมรรถนะของหัวเผาแล้ว จะเน้นไปที่การทดสอบสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิง เนื่องจากเป็นระบบที่ส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของหัวเผา เมื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงต่อความเร็วรอบใบสกรูขนถ่าย จะพบว่าตัวแปรทั้งสองให้ความสัมพันธ์กันในลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยเชื้อเพลิงต่างชนิดกันจะให้อัตราการขนถ่ายที่แตกต่างกัน เนื่องด้วยผลจากแพกเตอร์ความเต็มรางของวัสดุ และความหนาแน่นของวัสดุนั้นๆ และเมื่อศึกษาถึงอิทธิพลของแพกเตอร์ความเต็มรางของวัสดุจะพบว่าแพกเตอร์ความเต็มรางของวัสดุแทบจะไม่ส่งผลต่ออัตราการขนถ่ายวัสดุเลย เนื่องจากสกรูขนถ่ายที่ทำการออกแบบมีรางสกรูที่สั้น ส่งผลให้การสูญเสียระหว่างการขนถ่ายเกิดขึ้นน้อยมาก ดังนั้นตัวแปรต้นที่ส่งผลต่ออัตราการขนถ่ายวัสดุจะถูกตัดเหลือเพียงตัวแปรเดียว นั่นคือ ความหนาแน่นของวัสดุ จึงทำให้สามารถสรุปสมการในการประมาณค่าอัตราการขนถ่ายของชุดสกรูขนถ่ายที่ทำการออกแบบไว้ดังนี้ $m_s = 0.000632 \rho_b N$ หรือ $m_s = \rho_b (0.0019 f + 0.0003)$ ในหน่วย kg/min

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงต่อลักษณะของเปลวไฟ โดยทำจากการเปรียบเทียบลักษณะของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้อนุภาคสามขนาด ได้แก่ อนุภาคขนาดเล็กกว่า 1.5 mm, อนุภาคขนาดเล็กกว่า 1.0 mm และอนุภาคขนาดเล็กกว่า 0.5 mm ตามลำดับ จะพบว่าการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงขนาดเล็กกว่า 0.5 mm, ลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มไปในทางที่ดี ใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สั้น และให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าเปลวไฟที่เกิดจากอีกสองกลุ่มตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า

เมื่อพิจารณาถึงการทดสอบสมรรถนะของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) จะพบว่าชุดใบพัด (swirl blades) ที่ทำการออกแบบ สามารถสร้างกระแสอากาศหมุนควงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยได้ แต่กระแสหมุนควงที่ได้นั้นมีความรุนแรงที่ค่อนข้างต่ำ จากผลการทดสอบพฤติกรรมของเปลวไฟ และการเผาไหม้ที่เกิดจากมุมมองของใบพัดทั้งสามมุมที่ทำการทดสอบ จะพบว่าจะมีเพียงมุมใบพัดที่ 100 องศา ที่จะสามารถสร้างกระแสหมุนควงที่มีความรุนแรงเพียงพอต่อการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนวนบริเวณ IRZ และ ERZ จึงทำให้การเผาไหม้จะเกิดขึ้นบริเวณกลางค่อนมาหาส่วนต้นของห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งการที่จุดเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ หรือฐานของเปลวไฟอยู่ที่บริเวณส่วนต้นของหัวเผาเช่นนี้ จะส่งผลดีต่อเสถียรภาพของการเผาไหม้ จนส่งผลให้เกิดการเผาไหม้อย่างมีเสถียรภาพ และต่อเนื่องได้โดยไม่เกิดปรากฏการณ์เป่าดับ และเมื่อทำการทดลองเพื่อหาอัตราการเผาไหม้ที่หัวเผา พบว่าต้นแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย มีอัตราการเผาไหม้ที่มีเสถียรภาพอยู่ที่ 300 kW ถึง 500 kW ซึ่งต่ำกว่าผลที่ได้จากการจำลองไว้ในขั้นตอนของการออกแบบ เนื่องจากตัวแปรควบคุมของทั้งสองกรณีมีความแตกต่างกัน เช่น ชนิด และขนาดของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้มีความแตกต่างกัน รวมไปถึงความรุนแรงของกระแสอากาศหมุนควงของการทดลองจะน้อยกว่าขอบเขตที่ตั้งไว้ในแบบจำลอง เป็นต้น ซึ่งในอนาคตผลการทดลองที่ได้จะถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองให้มีความเหมาะสมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลอีกครั้ง แต่อย่างไรก็ตามย่านการเผาไหม้ดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมขนาดย่อมได้ โดยสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำได้สูงสุดประมาณ 0.5 ตันต่อชั่วโมง

ไอเสียถือเป็นตัวแปรหนึ่งที่สามารถบ่งชี้ถึงสมรรถนะของชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้ได้ หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ดีต้องสามารถเหนี่ยวนำให้อากาศ และเชื้อเพลิงเกิดการผสมผสานจนเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และปลดปล่อยแก๊สพิษในปริมาณต่ำ เมื่อพิจารณาแก๊สคาร์บอน

มอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้จะพบว่าสัดส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดค่าได้จากไอเสีย ที่ 300 kW 400 kW และ 500 kW ค่าเท่ากับ 3665 ppm 3045 ppm และ 3941 ppm ตามลำดับ ประเด็นที่ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณสูง เนื่องจากการผสมคลุกเคล้าที่ไม่ดีพอ ระหว่างอากาศ และอนุภาคของเชื้อเพลิง บวกกับการที่เปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ พุ่งเข้าปะทะกับ บริเวณผนังส่วนท้ายของห้องเผาไหม้ก่อนจะออกสู่ท่อทางออกที่เป็นตำแหน่งในการวัดไอเสีย ดังนั้น ตำแหน่งที่ทำการวัดไอเสียจึงเป็นบริเวณที่ปฏิกิริยาการเผาไหม้ยังไม่สิ้นสุด จึงทำให้วัดค่าของ คาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณที่สูง แต่เมื่อพิจารณาปริมาณออกซิเจนของไนโตรเจน (NO_x) พบว่าทั้ง สามย่านการเผาไหม้จะสามารถวัดค่าปริมาณออกซิเจนของไนโตรเจนที่ปนอยู่ในแก๊สไอเสียได้น้อยมาก และต่ำกว่าค่ามาตรฐานอุตสาหกรรม (ไม่เกิน 200 ppm) เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นเป็นเชื้อเพลิง แข็งที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน (N) ที่ค่อนข้างน้อย บวกกับการเผาไหม้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 1500 K จึงทำให้ไม่เกิด thermal NO_x ดังนั้นจึงอาจจะสรุปได้ว่าออกซิเจนของไนโตรเจน (NO_x) ที่วัด ค่าได้นั้นมาจาก Fuel NO_x

เนื่องจากปัญหาในด้านการเก็บตัวอย่างแฉ่ ดังนั้นการประเมินประสิทธิภาพการเผาไหม้ จึงต้องประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ผงมาเป็นเครื่องมือในการประเมิน ซึ่งจากผลการคำนวณจะพบว่า หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผา ไหม้ช่วย (pre-chamber) ที่ทำการพัฒนานั้นมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_{comb}) ประมาณ 96 %

สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งได้ทำการจำลองเพื่อตรวจสอบ อิทธิพลของตัวเลขการไหลหมุนวน ต่อพฤติกรรมของการเผาไหม้ สนามการไหล ความดัน อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นขององค์ประกอบของแก๊ส ได้ทำการอภิปรายผล จากผลการจำลองนั้นแสดงให้เห็นว่า ตัวเลขการไหลหมุนวนมีบทบาทสำคัญในการเผาไหม้โดยช่วยให้การผสมคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิง กับอากาศ และเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลหมุนวน จากผลลัพธ์สามารถสรุปได้ดังนี้

ที่ตัวเลขการไหลหมุนวน 0.8, 0.9 และ 1.0 ซึ่งเกิดความดันตกคร่อมต่ำ และมีความเร็ว ตามแนวแกนต่ำ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เผาไหม้ไม่หมดภายในเตาและหลงเหลือแล้วไหลออกไปที่ ท่อทางออก สำหรับแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะเกิดขึ้นต่ำที่ตัวเลขการไหลหมุนวนดังกล่าวนี้ ที่ตัวเลขการ ไหลหมุนวนเท่ากับ 1.1 ซึ่งมีความดันตกคร่อม ความเร็วในแนวแกน และความเข้มข้นของแก๊ส ไนโตรเจนออกไซด์สูงกว่าที่ตัวเลขการไหลหมุนวนเท่ากับ 0.8, 0.9 และ 1.0 สำหรับที่ตัวเลขการไหล หมุนวนเท่ากับ 1.2 ซึ่งมีความดันตกคร่อม ความเร็วตามแนวแกนภายในเตา และความเข้มข้นของ แก๊สไนโตรเจนออกไซด์นั้นมีค่าสูงกว่าที่ตัวเลขการไหลหมุนวนเท่ากับ 0.8, 0.9, 1.0 และ 1.1 ส่วน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นเผาไหม้หมดภายในเตา

ดังนั้น ผลจากการศึกษานี้ช่วยให้ชี้แนะการออกแบบหัวเผาที่มีการไหลหมุนวนและ สภาวะการทำงานของเตา เมื่อพิจารณาถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของคาร์บอนมอนอกไซด์และการ ปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ต่ำ ตัวเลขการไหลหมุนวนที่ 1.1 จึงเหมาะสมกับการทำงานของเตาเผา ไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงนี้

8.2 ข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้จะทำการกล่าวถึงข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับระบบทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อประโยชน์สำหรับการพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง ต่อไปในอนาคต หรือเพื่อนำข้อมูลการวิจัยไปต่อยอด และนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาหัวเผ่าสำหรับการใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยมีรายละเอียดดังนี้

8.2.1 ควรมีการออกแบบ และปรับเปลี่ยนชุดใบบิด (swirl blades) ให้สามารถสร้างกระแสอากาศหมุนควงที่มีความรุนแรงที่มากขึ้น โดยคาดหวังว่าจะทำให้เกิดความปั่นป่วนที่มากขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย ส่งผลให้สมรรถนะในการเผาไหม้สูงขึ้น และมีงานการทำงานที่กว้าง และหลากหลายมากขึ้น

8.2.2 ควรมีการเปลี่ยนประเภทของเครื่องบดเชื้อเพลิง ให้มีความเหมาะสมสำหรับการบดเชื้อเพลิงชีวมวล และมีอัตราการผลิตที่สูงกว่ากำลังการเผาไหม้สูงสุดที่จะทำการทดสอบ เพื่อให้สามารถบดเชื้อเพลิง และจ่ายเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง

8.2.3 ควรทำการศึกษาสัดส่วนของอากาศทั้งสามส่วน ที่มีความเหมาะสมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่กำลังความร้อนต่างๆ รวมไปถึงศึกษาถึงอากาศส่วนเกินที่มีความเหมาะสมกับหัวเผา และการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

8.2.4 ควรทำการศึกษาถึงศักยภาพด้านการแผ่รังสี และการพาความร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุง และพัฒนาหัวเผ่าให้มีศักยภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของแก๊สร้อน และมวลอนุภาคเชื้อเพลิง ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มสมรรถนะ และประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหัวเผา

8.2.5 ควรมีการออกแบบ และปรับปรุงระบบบำบัดไอเสีย โดยการปรับปรุงหัวฉีดน้ำ และควบคุมอัตราการฉีดน้ำให้เกิดความสมดุลกับปริมาณแก๊สร้อนที่กำลังความร้อนต่างๆ เพื่อให้สมรรถนะในการดักฝุ่น และเถ้าลอยสูงขึ้น ช่วยลดปัญหามลพิษทางอากาศ

บทที่ 9

สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

เมื่อพิจารณาตารางที่ 9.1 แสดงผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ ที่ได้เขียนไว้ในข้อเสนอของโครงการวิจัย ซึ่งเมื่อผ่านปีที่ 2 ของการวิจัย (ปีงบประมาณ 2558) ผลผลิตที่ทางทีมวิจัยได้ทำจนบรรลุข้อเสนอ นั้น ได้แก่

1. การประชุม / สัมมนา ระดับชาติ (National Conference)

ชินภัทร ธุระการ, ธนภัทร ภักดีรวงศ์ และจารุวัตร เจริญสุข, "การศึกษาย่านการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีมุมผนังทางออก 90 องศา", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 (ME-NETT 28), 15-17 ตุลาคม 2557, รหัสบทความ AEC-101

2. การผลิตบัณฑิต ระดับบัณฑิตศึกษา จำนวน 1 คน

นายชินภัทร ธุระการ สำเร็จการศึกษา ภาควิชาการศึกษาศาสตร์ 2/2557

3. องค์ความรู้ใหม่

ค้นพบชุดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวล (บทที่ 7)

4. ต้นแบบ

ต้นแบบหัวเผาเชื้อเพลิงฝุ่น แบบมีห้องเผาไหม้ช่วย และระบบสนับสนุนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฝุ่น ระดับห้องปฏิบัติการ (Lab Prototype)

ตารางที่ 9.1 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ (Publications)				สถานะ
● วารสาร ระดับนานาชาติ (International Journal)	G :วารสาร ที่มีชื่ออยู่ในฐานข้อมูล ISI เช่น renewable energy หรือ อื่นๆ	1	2558	อยู่ระหว่างดำเนินการ
● การประชุม / สัมมนา ระดับนานาชาติ (International Conference)	I: เผยแพร่ผลการจำลองการเผาไหม้ของห้องเผาไหม้ที่ปรับปรุงด้วยการปรับเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวลชนิดฝุ่น	1	2557	อยู่ระหว่างดำเนินการ
● การประชุม / สัมมนา ระดับชาติ (National Conference)	I: เผยแพร่ผลการศึกษาผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนอัตราการเผาไหม้ด้วยการจำลอง	1	2557	แล้วเสร็จ
การผลิตบัณฑิต	I: ระดับบัณฑิตศึกษา	1	2558	แล้วเสร็จ
องค์ความรู้ใหม่	P: ค้นพบชุดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายอัตราการเผาไหม้ถ่านชาร์ของเชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวล	1	2557	แล้วเสร็จ

ตารางที่ 9.1 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ (ต่อ)

ต้นแบบ				
ระดับห้องปฏิบัติการ (Lab Prototype)	G: หัวเผาเชื้อเพลิงฝุ่น แบบมีห้องเผาไหม้ช่วย	1	2557	แล้วเสร็จ
การถ่ายทอดเทคโนโลยีต่างๆ (ระบุประเภท และจำนวนครั้ง / จำนวนคนที่คาดว่าจะเข้าร่วม เช่น ฝึกอบรมเรื่อง จำนวน จัดสัมมนา อบรมเชิงปฏิบัติการ เป็นต้น)	G: สัมมนาเผยแพร่ความรู้ ครั้งละ 10 คน	1	2558	อยู่ระหว่างดำเนินการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Roberto et al. "Characterization of Spanish biomass wastes for energy use." **Bioresource Technology** 103, 2012. pp. 249-258.
- [2] อุกฤษฏ์ สหพัฒน์สมบัติ และคณะ. “การศึกษาเบื้องต้นถึงคุณภาพของชีวมวลสำหรับเชื้อเพลิงไม้อัดแท่ง.” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21. 2550. หน้า 36-40.
- [3] K.D. Tiggesa et al. “Conversion of Existing Coal-Fired Power Plants to Oxyfuel Combustion : Case Study with Experimental Result and CFD Simulations.” **Energy Procedia** 1. 2009. pp. 549-556.
- [4] Shan Xue et al. “Experimental investigation on NO_x emission and carbon burnout from a radially biased pulverized coal whirl burner.” **Fuel Processing Technology** 90. 2009. pp. 1142-1147.
- [5] อธิพัทธ์ ลิ้มกุล. “การประยุกต์หลักการอากาศไหลหมุนควงในเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล.” **วิศวกรรมลาดกระบัง**. ปีที่ 28 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2554.
- [6] Norbert Modlinski. "Computational modeling of a utility boiler tangentially-fired furnace retrofitted with swirl burners." **Fuel Processing Technology** 91. 2010. pp. 1601-1608.
- [7] กันตภณ อุดมโชคปิติ. “การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อการออกแบบหัวเผาถ่านหินผงที่มีการหมุนวนก๊าซไอเสีย.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [8] Jun Li et al. " Flame characteristics of pulverized torrefied-biomass combusted with high-temperature air." **Combustion and Flame** 160. 2013. pp.2585-2594.
- [9] M. Mando L et al. “Pulverized straw combustion in a low-NO_x multifuel burner : Modeling the transition from coal to straw.” **Fuel** 89, 2010. pp. 3051 - 3062.
- [10] M.M. Kamal. “Parametric study of combined premixed and non-premixed flame coal burner.” **Fuel** 87, 2008. pp. 1515-1528.
- [11] Akio Nishiyama et al. “Fuel and emissions properties of Stirling engine operated with wood powder.” **Fuel** 86, 2007. pp. 2333-2342.
- [12] ธนภัทร์ ภักดีวรวงศ์. "การจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง." วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [13] เอกสารประกอบการสอน “พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ” บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
- [14] J. Ballester , J. Barroso, L.M. Cerecedo, R. Ichaso., “Comparative study of semi-industrial-scale flames of pulverized coals and biomass” **Combustion and Flame** 141 (2005) 204–215
- [15] Bernard Fisher. Biomass suspension burner. US. EP 0 143 510 A1. 07 August 1984.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] จารุพงษ์ แดงนิษฐ์, ภูริณัฐ ศิริบุญ, ศุภาพิชญ์ รัตนพลที. ระบบป้อนเชื้อเพลิงฝุ่นเข้าสู่หัวเผาไหม้ชีวมวล. ปริญญานิพนธ์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [17] ชินภัทร ธุระการ. "การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2558.
- [18] วันชัยพร คงนคร, วิศรุต เพ็งบุญมา, ศรัณยู คงสวัสดิ์วรกุล. การพัฒนาระบบป้อนและบดเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับหัวเผาชนิดฝุ่น. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [19] ฐิติชญาพร สุธเดช, ณัฐวัตร ลีลาจินดาไกรฤกษ์, ธรรมชัย จิตตวัฒน์รัตน์. หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [20] กุลพัฒน์ กุลกำรธร, สุรวิษฐ์ กลั่นเลี้ยง, อภิชา เลิศพรเจริญ. การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.

ภาคผนวก ก.

ภาพภายนอก และภายในอาคารปฏิบัติการ



ภาพที่ ก.1 ภายนอกอาคาร (ด้านหน้า)



ภาพที่ ก.2 ภายนอกอาคาร (ด้านหลัง)

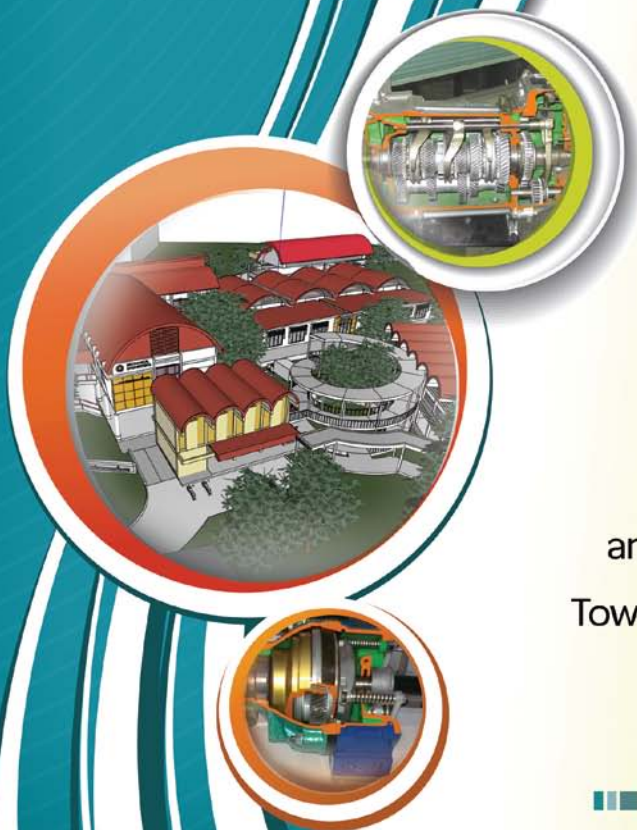


ภาพที่ ก.3 ภายในอาคาร

ภาคผนวก ข.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



The 28th Conference of
Mechanical Engineering Network of Thailand
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล
แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28
วันที่ 15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น



"Driving ME
Research
Education
and Innovation
Towards Creative
Economy"



AEC-101

การศึกษาย่านการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีมุมผนังทางออก 90 องศา The Investigation on Operation Range of Biomass Pulverized Burner with 90 Degrees of Outlet Wall Angle

ชินภัทร ฐะการ, ธนภัทร ภักดีวรวงศ์ และ จารุวัตร เจริญสุข*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
*ติดต่อ: โทรศัพท์ : 023 264 197, โทรสาร : 023 264 198, E-mail : kjaruw@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อออกแบบและพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล โดยจะเป็นการนำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการเผาไหม้ ที่ผ่านการจำลองเทียบเคียงกับเตาเผาเชื้อเพลิงถ่านหินผงบ มาประยุกต์ใช้กับการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับหัวเผาแบบ pre-chamber ขนาด 1 MW เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำหัวเผานี้มาใช้ในงานจริง จากการศึกษาพบว่าหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออกเท่ากับ 90 องศา ทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคมีการพุ่งกระจายที่มากขึ้นภายใน pre-chamber ส่งผลให้อนุภาคสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง จึงนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเผาไหม้ ซึ่งช่วยให้สามารถลดความเสี่ยงภาพในการเผาไหม้ได้ ในส่วนของการศึกษาเพื่อตรวจสอบย่านการทำงานที่เหมาะสมสำหรับหัวเผาดังกล่าวพบว่าหัวเผานี้มีย่านการทำงานอยู่ระหว่าง 450 kW ถึง 1 MW ซึ่งเป็นช่วงที่หัวเผาสามารถรักษาเสถียรภาพในการเผาไหม้ และให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งหากเพิ่มกำลังความร้อนจากการเผาให้สูงกว่า 1 MW จะเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ (blow-off) แต่หากลดกำลังความร้อนจนต่ำกว่า 450 kW จะเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้มีอนุภาคชาร์ และสารระเหยหลงเหลือไปกับไอเสีย ซึ่งถือเป็นการทิ้งพลังงานในส่วนดังกล่าวไปโดยไร้ประโยชน์

คำหลัก: กระบวนการเผาไหม้; การจำลอง; เชื้อเพลิงชีวมวล

Abstract

This work involves with the design and development of a pulverized biomass burner. In order to assess its capability on real plant, the validated mathematical model for coal combustion was applied for simulation of pulverized biomass fuel with pre-chamber burner with sizing of 1 MW. From simulation, it was found that pre-chamber burner with 90 degrees of outlet wall angle could improve the distribution of particle trajectories and their average residence time was also increased. This improvement had caused particles reacting continuously in the pre-combustion chamber thus enabling combustion stability. As part of a study to investigate the proper operation range for pre-chamber burner with 90 degrees of outlet wall angle, we found that burner can be operated at 450 kW up to 1 MW, which can maintain the stability and provide complete combustion. If increasing the thermal throughput greater than 1 MW, Blow-Off phenomenon would occur. However reducing the thermal throughput less than 450 kW would cause incomplete combustion. A result, char particles and volatile were left unburned at the exhaust indicating loss of energy.

Keywords: Combustion; Simulation; Biomass

AEC-101

1. บทนำ

ปัจจุบันพลังงานทดแทนถือได้ว่าเป็นตัวเลือกอันดับแรกๆที่ทั่วโลกให้ความสนใจ และได้รับความสำคัญเป็นอย่างมากในประเทศไทย ซึ่งสังเกตได้จากแผนการกำหนดนโยบายในการพัฒนาประเทศที่สนับสนุนให้มีการหาแหล่งพลังงานทดแทนต่างๆ พลังงานชีวมวล (biomass) จึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ ซึ่งพลังงานชีวมวลนั้นมาจากองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตหรือสารอินทรีย์ต่างๆรวมทั้งวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเช่น ไม้ฟืน แกลบ และกากอ้อย เป็นต้น โดยชีวมวลนั้นมีข้อดีคือจะก่อให้เกิดแก๊สมลพิษ เช่น SO_2 และ NO_x ในปริมาณที่น้อย

สำหรับการศึกษาในอดีตของทีมนักวิจัย ชนภัทร ภักดีวรวัจน์ และคณะ [1] ได้นำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการเผาไหม้ ที่ผ่านการจำลองเทียบเคียงกับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินผง มาประยุกต์ใช้กับการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงสำหรับหัวเผา pre-chamber ขนาด 1 MW พบว่า pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา ทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคมีการฟุ้งกระจายที่มากขึ้นภายใน pre-chamber ส่งผลให้อนุภาคสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง และคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้โดยไม่มีการเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ (blow - off) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษายานการทำงานของหัวเผาดังกล่าว เพื่อทำนายถึงความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

2. สมการพื้นฐานของแบบจำลอง

2.1 แบบจำลองของแก๊ส [2]

การเคลื่อนที่ของแก๊สได้อธิบายในระนาบสองมิติ โดยที่ Reynolds - average Navier-Stokes (RANS) ถูกกำหนดให้อยู่ในสภาวะคงตัว (Steady-State) และเสริมด้วยแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ Turbulence ซึ่งสมการควบคุม (Governing Equation) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\nabla \cdot (\rho U \Phi) - \Gamma_{\Phi} \nabla^2 \Phi = S_{\Phi} \quad (1)$$

เมื่อ U คือเวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ย, ρ คือความหนาแน่น และ S_{Φ} คือ source term โดยที่สมการควบคุมที่ใช้สำหรับแก้ไขปัญหาการเคลื่อนที่ของแก๊สประกอบด้วย มวล (m), ความเร็วตามแนวแกน (u, v) พลังงานจลนศาสตร์ของความปั่นป่วน (k) อัตราการสลายตัว (ε) เอนทัลปี (H) และเศษส่วนเชิงมวลของแต่ละสปีชีส์ (Y_i) ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่ง μ_t คือความหนืดของการปั่นป่วน λ คือ การนำความร้อน และ Γ คือการแพร่ของโมเลกุลของแต่ละสปีชีส์

ตารางที่ 1 ตัวแปร Φ , Γ_{Φ} และ S_{Φ} ในสมการควบคุมสำหรับแก๊ส

	Φ	Γ_{Φ}	S_{Φ}
มวล	1	0	$\dot{m}$, มวลรวมที่ถ่ายเทออกจากอนุภาค
โมเมนตัม	u, v	$\mu + \mu_t$	F_D , แรงดุด (drag force) ของอนุภาค
พลังงาน	H	$\lambda + \frac{\mu_t}{\sigma_H}$	S_H , ปฏิกิริยาทางความร้อน และการพาหรือการแผ่รังสีความร้อนออกจากอนุภาค
สัดส่วนเชิงมวลของแก๊ส i	Y_i	$\Gamma + \frac{\mu_t}{\sigma_{Y_i}}$	S_{Y_i} , อัตราการทำปฏิกิริยาเคมีของแก๊ส i
พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน	k	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$P_k - \rho \varepsilon$
อัตราการกระจายตัวของความปั่นป่วน	ε	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}}$	$C_1 \frac{\varepsilon}{k} P - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{K}$

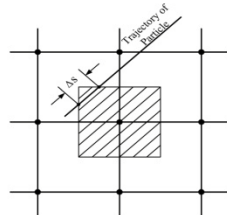
$$\text{โดย } \mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad P_k = (\mu + \mu_t) \nabla U \cdot (\nabla U + (\nabla U)^T)$$

$$\text{ค่าคงที่: } C_{\mu} = 0.09, \quad C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92$$

AEC-101

2.2 แบบจำลองของอนุภาค [3]

การกระจายตัวของอนุภาคถูกจำลองโดยใช้วิธี Lagrangian การถ่ายเทมวล โมเมนตัม และพลังงานของอนุภาคที่มีผลต่อแก๊สเฟสจะเกี่ยวข้องกับตำแหน่งที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน สามารถคำนวณได้โดยเทคนิค Particle Source In Cell Techniques (PSICT) [4] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาคโดยใช้วิธี Lagrangian ผ่านเซลล์

2.2.1 สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{dm_p}{dt} = R_m \quad (2)$$

R_m คืออัตราเชิงปริมาตรของมวลที่ออกจากอนุภาคสู่แก๊ส โดยการปลดปล่อยสารระเหยหรือสารในการเผาไหม้ โดยที่

$$R_m = k_0 \exp\left(-\frac{E_{dvol}}{R_u T}\right) (V^* - V) \quad (3)$$

V คือปริมาณสะสมของสารระเหยที่ปล่อยออกมา, V^* คือปริมาณทั้งหมดของสารระเหยภายในถ่านหิน, R_u คือค่าคงที่สากลของแก๊ส, T คือค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์, k_0 คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลอง และ E_{dvol} คือพลังงานกระตุ้น

2.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และการเคลื่อนที่เฉลี่ย

$$\frac{dm_p \tilde{u}_i}{dt} = \sum \bar{F}_i \quad (4)$$

พจน์ทางด้านขวาเกิดจากแรงภายนอก ซึ่งส่วนใหญ่ เกิดจากแรงจุดที่กระทำต่ออนุภาค [1,3]

2.2.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

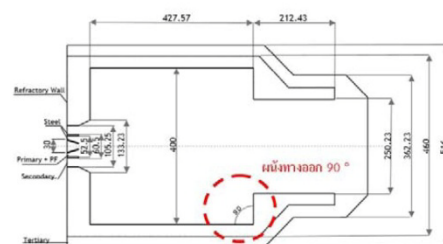
สมดุลพลังงานเกิดจากผลรวมการถ่ายเทความร้อนของอนุภาค ความร้อนจากการเผาไหม้ของสารและความร้อนจากการระเหยในกระบวนการปล่อยสารระเหย เป็นต้น ดังนั้นสมการอนุรักษ์พลังงานคือ

$$\frac{d(m_p c_p T_p)}{dt} = m_p \dot{Q}_t - c_p T_p \left(-\frac{dm_p}{dt} \right) - L_v \frac{dm_p}{dt} \quad (5)$$

เมื่อ L_v คือความร้อนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายเชื้อเพลิงในรูปของแข็งกลายเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส (thermal decomposition) (kJ/kmol), c_p คือความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K), T_p คืออุณหภูมิ

3. ลักษณะของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

รูปที่ 2 แสดงภาพลักษณะของหัวเผา pre-chamber สำหรับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีขนาดเท่ากับ 1 MW โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในหัวเผา pre-chamber มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.4 เมตร และมีความยาวประมาณ 0.8 เมตร ขณะที่ตำแหน่งผนังของ pre-chamber ถูกออกแบบมาเป็นผนังปูนทนไฟ ในขณะที่เตาเผา จะถูกจำลองให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกแนวนอน มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเตาเผาเท่ากับ 0.6 เมตร และมีความยาว 3.0 เมตร



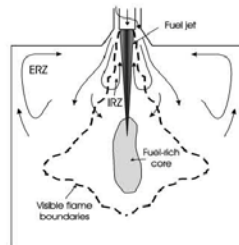
รูปที่ 2 ลักษณะของหัวเผา pre-chamber

AEC-101

ลักษณะของอากาศพลศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผงสามารถแบ่งได้เป็นสองลักษณะ คือ บริเวณที่มีการหมุนวนของกระแสภายในแกนกลางของเตาเผา (Internal Recirculation Zone, IRZ) และบริเวณที่มีการหมุนวนของกระแสนอกแกนกลางของเตาเผา (External Recirculation Zone, ERZ) ดังแสดงในรูปที่ 3

3.1 เงื่อนไขที่ใช้การเผาไหม้ชีวมวล

การไหลกำหนดให้เป็นแบบสมมาตรรอบแนวแกน 2 มิติ (2D-Axisymmetric) และสภาวะคงตัว (Steady State) โดยมีอัตราการก่อเกิดของมวลและความร้อนที่ถ่ายโอนมาจากอนุภาคที่จุดใดจุดหนึ่งในโดเมนของก๊าซเป็นแบบคงตัวเช่นกัน ในทำนองเดียวกันนั้น ใช้แบบจำลองการเผาไหม้ Species Transport แบบจำลองการปั่นป่วน $k-\epsilon$ Standard โดยมีการเพิ่มค่าคงที่ของอัตราการแพร่ออกซิเจนภายในพื้นผิวอนุภาคคาร์บอน (C_1) และอัตราจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอน (C_2) ในอัตราส่วน 2.5 เท่าของค่าเริ่มต้น และใช้แบบจำลองการติดตามแบบสุ่ม (Random Walk) โดยที่ค่า Kinetic Parameters ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 3 รูปแบบของกระแสการไหลในเตาเผาไหม้ [5]

ตารางที่ 2 Kinetic Parameters สำหรับแบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

Kinetic parameters :	
Devolatilization, E_{dvol} (J/kg-mol)	7.40×10^7
Pre-Exponential Factor	3.82×10^5
Char reaction, E (J/kg-mol)	7.90×10^7

สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการศึกษาคือ หญ้าเนเปียร์ ซึ่งมีสมบัติและองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 3 โดยที่เป้าหมายของการจำลองในขั้นต้น หัวเผาจะต้องสามารถเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่องที่กำลังความร้อน 1 MW ตารางที่ 4 แสดงถึงเงื่อนไขในการป้อนอากาศ ปริมาณอากาศ และเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 1MW

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของหญ้าเนเปียร์อัดแท่ง (pellet) (Thailand Institute of Scientific and Technological Research)

การวิเคราะห์โดยประมาณ	(% โดยน้ำหนัก)
สารระเหย	66.91
คาร์บอนคงตัว	20.22
ความชื้น	4.57
ขี้เถ้า	8.30
การวิเคราะห์โดยละเอียด	(% โดยน้ำหนัก)
คาร์บอน	45.92
ไฮโดรเจน	6.58
ไนโตรเจน	8.30
กำมะถัน	0.11
ออกซิเจน	39.09
ปริมาณความร้อน (MJ/kg)	17.22

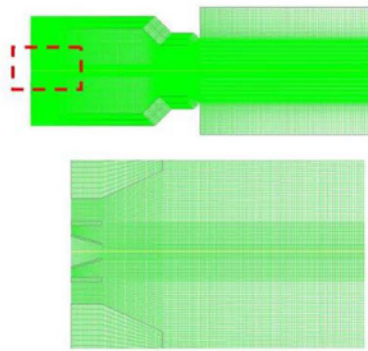
ตารางที่ 4 เงื่อนไขการจำลองสำหรับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

Primary pipe:	Air flow rate (kg/s)	6.613×10^{-2}
	Swirl number	0.0
	อุณหภูมิ (K)	308
	อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/s)	5.807×10^{-2}
Secondary pipe:	Air flow rate (kg/s)	2.645×10^{-1}
	Swirl number	1.03
	อุณหภูมิ (K)	308
Tertiary pipe:	Air flow rate (kg/s)	1.102×10^{-1}
	Swirl number	0.0
	อุณหภูมิ (K)	308
อากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ (%)		30

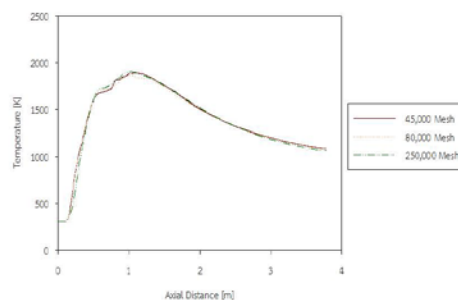
AEC-101

3.2 ลักษณะของกริดที่ใช้ในการจำลอง

สำหรับกริดที่ใช้ในการจำลองนั้น จะมีความละเอียดประมาณ 45,000 และมีความละเอียดมากเป็นพิเศษที่บริเวณหัวเผา เนื่องจากบริเวณนี้คาดว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของไหลในอัตราที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆ ดังแสดงรูปที่ 4 ซึ่งตัวเลขความละเอียดดังกล่าว เคยผ่านการพิสูจน์โดยทำการเปรียบเทียบกับกริดที่มีความละเอียดประมาณ 250,000 ก่อนหน้านี้แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยให้ผลของการจำลองที่ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงได้ใช้กริดที่มีความละเอียดเท่ากับ 45,000 ในการจำลอง เพื่อที่จะลดระยะเวลาในการคำนวณ



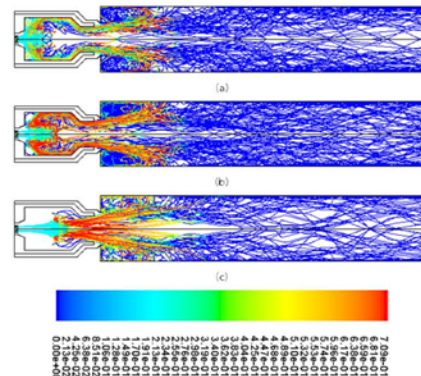
รูปที่ 4 ลักษณะของกริดที่ใช้ในการจำลอง



รูปที่ 5 การวิเคราะห์จำนวน Element ที่เหมาะสม

4. ผลการจำลองของหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 135 และ 90 องศา (1 MW) [6]

จากผลการจำลองของหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 135 องศา พบว่าหัวเผาไม่สามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการเป่าดับ เนื่องจากระยะเวลาการเผาไหม้ และการฟุ้งกระจายของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้อาจจะน้อยเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 6 จึงทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงหลุดลอยออกจากช่วงที่มีการผสมผสานกันระหว่างการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุทำให้ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิจุดติด (Ignition) เอาไว้ได้

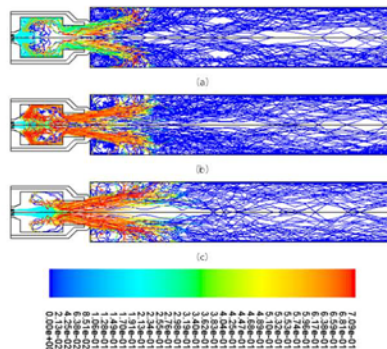


รูปที่ 6 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคระหว่างการเผาไหม้ (Pre-Chamber 135°); (a) อนุภาคนขนาดเล็ก 10 - 30, (b) กลาง 40 - 70 และ (c) ใหญ่ 80 - 100 ไมครอน

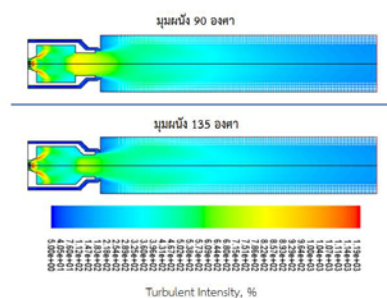
หลังจากที่ทราบถึงสาเหตุของปรากฏการณ์การเป่าดับ จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนมุมของผนังบริเวณทางออกเป็น 90 องศา โดยหวังว่าจะเป็น การเพิ่มการฟุ้งกระจายของอนุภาค และระยะเวลาในการเผาไหม้ ซึ่งผลก็ปรากฏว่าหัวเผาที่มีมุมผนังดังกล่าวสามารถรักษาความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ โดยไม่มีการเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปที่ 6 กับรูปที่ 7 ซึ่งแสดงเส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคระ

AEC-101

ระหว่างการเผาไหม้สำหรับหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 135 และ 90 องศาตามลำดับ โดยที่จะสังเกตเห็นว่าทั้งสองรูปมีการกระจายตัวของอนุภาคบริเวณ IRZ และ ERZ ภายในห้องเผาไหม้ แต่จะพบว่าผนัง 90 องศาจะเป็นตัวขวางกั้นให้อนุภาคนขนาดใหญ่มีการฟุ้งกระจายภายในเตามากกว่ากรณีมุมผนัง 135 องศา ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 8 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบถึงการกระจายตัวของความเข้มข้นของความปั่นป่วน พบว่า pre-chamber ที่มีผนังทางออก 90 องศาจะมีความเข้มข้นของความปั่นป่วนสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน



รูปที่ 7 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคระหว่างห้องเผาไหม้ (pre-chamber 90°); (a) อนุภาคนขนาดเล็ก 10 - 30, (b) กลาง 40 - 70 และ (c) ใหญ่ 80 - 100 ไมครอน



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบถึงการกระจายตัวของความเข้มข้นของความปั่นป่วน

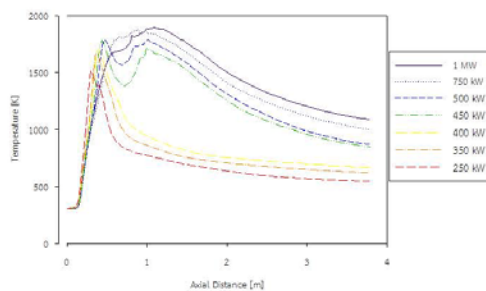
5. การจำลองย่านการทำงานของหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา

จากผลการจำลองในหัวข้อข้างต้นทำให้ทราบว่าหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา สามารถรักษาเสถียรภาพของการเผาไหม้เอาไว้ได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเป็นการจำลองเพื่อหาย่านการทำงานที่มีความเหมาะสมกับหัวเผาดังกล่าว ซึ่งจะทำให้การจำลองที่ค่ากำลังความร้อนจากการเผาไหม้ในช่วง 250 kW จนถึง 1.25 MW ซึ่งเงื่อนไขในการจำลองจะทำการคงค่าอากาศส่วนเกิน (excess air) ไว้ที่ 30% แล้วทำการปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิง และอากาศตาม firing rate ในช่วงที่ต้องการศึกษา

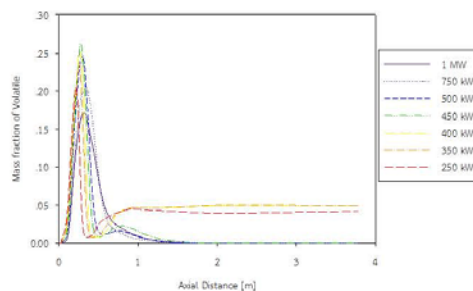
จากรูปที่ 9 และ 10 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ และการกระจายตัวของสารระเหยตามแนวยาวของเตาเผา ตามลำดับ ซึ่งจากรูปทั้งสองจะสังเกตเห็นพฤติกรรมของการเผาไหม้เป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นการเผาไหม้ในช่วง 450 kW ถึง 1 MW ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของเปลวไฟที่ 1 MW จะมีค่าสูงที่สุดในขณะที่สภาวะ 450 kW จะให้อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดในกลุ่ม ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความเข้มข้นของสารระเหย เมื่ออุณหภูมิยังสูงการเผาไหม้ยังเกิดความร้อนมากขึ้น ดังนั้นปริมาณความเข้มข้นของสารระเหยที่สภาวะ 1 MW จึงมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะอื่นๆในกลุ่ม เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ จะพบว่าการเผาไหม้ในเตาจะเกิดขึ้นสองช่วง การเผาไหม้ช่วงแรกจะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของ pre-chamber ในขณะที่จะมีอนุภาคของเชื้อเพลิงบางส่วนถูกอิทธิพลของ swirl เหวี่ยงไปชนกับผนังของ pre-chamber และวิ่งชนกับผนังออกไป ส่งผลให้อนุภาคนั้นจึงไม่ได้รับการเผาไหม้ในช่วงดังกล่าว ในส่วนของการเผาไหม้ช่วงที่สองจะเกิดขึ้นในบริเวณส่วนต้นของท่อไฟใหญ่ ซึ่งอนุภาคเชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้ในช่วงแรกจะถูกเผาไหม้ในบริเวณนี้ทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของสารระเหยที่ลดลงจนหมดหลังจากผ่านบริเวณนี้ไป

AEC-101

ในส่วนของพฤติกรรมการเผาไหม้กลุ่มที่สองจะเป็นการเผาไหม้ที่สภาวะ 250 kW ถึง 400 kW ซึ่งอุณหภูมิของการเผาไหม้ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกลุ่มแรก เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิจะพบว่า การเผาไหม้จะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของ pre-chamber เพียงช่วงเดียว ส่งผลให้อนุภาคของเชื้อเพลิงที่ถูกอิทธิพลของ swirl เหวี่ยงไปชนกับผนังของ pre-chamber ไม่ได้รับการเผาไหม้ จึงทำให้มีปริมาณสารระเหยหลงเหลืออยู่เป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับพฤติกรรมการเผาไหม้กลุ่มแรก ดังนั้นอาจถือได้ว่าพฤติกรรมการเผาไหม้ของกลุ่มนี้เป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์



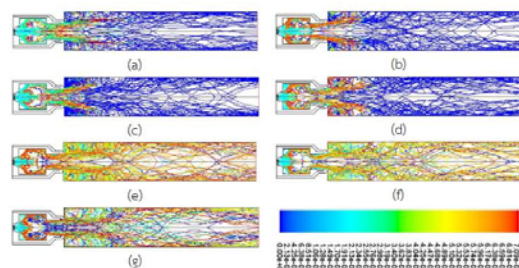
รูปที่ 9 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนว Axial ของเตาเผา



รูปที่ 10 ลักษณะการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหยตามแนว Axial ของเตาเผา

เมื่อพิจารณารูปที่ 11 แสดงเส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของชาร์ (Particle Char Fraction) พบว่าที่สภาวะ 1 MW, 750 kW, 500 kW และ 450 kW อนุภาคชาร์จะถูกเผาไหม้จนหมด ในขณะที่สภาวะ 400 kW, 350 kW และ 250 kW นั้นจะเหลืออนุภาคชาร์ที่ไม่ได้รับการเผาไหม้หลงเหลืออยู่พอสมควร ซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิงที่ถูกอิทธิพลของ swirl เหวี่ยงไปชนกับผนังของ pre-chamber ไม่ได้รับการเผาไหม้ ซึ่งเป็นเหตุผลที่สอดคล้องกับปริมาณสารระเหยที่ได้กล่าวไว้ในเบื้องต้น

นอกจากนี้เมื่อทำการจำลองการเผาไหม้ที่สภาวะ 1.25 kW พบว่าหัวเผาไม่สามารถคงความเสถียรภายในการเผาไหม้ไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์การเป่าดับ ในลักษณะเช่นเดียวกับกรณี pre-chamber ที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 135 องศา เนื่องจากความเร็วก๊าซสูงเกินไปภายในห้องเผาไหม้ของ pre-chamber จึงทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงหลุดลอยออกจากบริเวณที่ต้องการให้มีการผสมผสานกันระหว่างการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุทำให้อนุภาคนั้นไม่อาจรักษาการจุดติด (Ignition) ไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ลักษณะดังกล่าว



รูปที่ 11 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของชาร์ (Particle Char Fraction)
(a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW,
(e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW

AEC-101

6. สรุป

จากผลการจำลองการเผาไหม้ที่ 1 MW สำหรับหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา สามารถทำให้การกระจายตัวของอนุภาคมากขึ้นภายในห้องเผาไหม้ในส่วน of pre-chamber เนื่องจากผนัง ณ บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ pre-chamber ได้กั้นขวางเส้นทางเดินของอนุภาคได้บางส่วน จึงเป็นสาเหตุทำให้อนุภาคบางส่วนมีเส้นทางเดินแบบย้อนกลับและมีระยะเวลาในการเดินทางของอนุภาคมากขึ้น จึงทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ (residence Time) ภายในห้องเผาไหม้ของ pre-chamber เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้มีการปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็วภายในห้องเผาไหม้ของ pre-chamber และทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิสูงขึ้นในบริเวณนี้เท่ากับ 1894 K ในทำนองเดียวกันนั้นสามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้โดยไม่มีการเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับเมื่อทำการศึกษาเพื่อหาช่วงการทำงานที่เหมาะสมสำหรับหัวเผาที่ทำการศึกษา จากผลการจำลองพบว่าหัวเผานี้มีช่วงการทำงานอยู่ระหว่าง 450 kW ถึง 1 MW ซึ่งจะเป็นช่วงที่หัวเผาสามารถรักษาเสถียรภาพในการเผาไหม้ และให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งหากเพิ่มกำลังความร้อนจากการเผาให้สูงกว่า 1 MW จะเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ (blow-off) แต่หากลดกำลังความร้อนจนต่ำกว่า 450 kW จะเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้มีอนุภาคคาร์บอนและสารระเหยหลงเหลือ ซึ่งถือเป็นการทิ้งพลังงานในส่วนดังกล่าวไปโดยไร้ประโยชน์

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ชนภัทร ภักดีวงศ์. "การจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง." วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.

- [2] Y.S. Shen, B.Y. Guo, A.B. Yu, P. Zulli. (2009). A Three-Dimensional Numerical Study of The Combustion of Coal Blends in Blast Furnace, *Fuel* 88, pp. 255-263.
- [3] J.Charoensuk, (1996). *The Application of Mathematical Model for Scaling Pulverized coal combustors*, Ph.D Thesis, University of London.
- [4] S.M.A. Rizvi. (1985). *Prediction of Flow, Combustion and Heat Transfer in Pulverized Coal Flames*, Ph.D. Thesis of University of London and the Diploma of Membership of the Imperial College.
- [5] J. Ballester, J. Barroso, L.M. Cerecedo, R. Ichaso. (2005). Comparative Study of Semi-Industrial-Scale Flames of Pulverized Coals and Biomass, *Combustion and Flame* 141, pp. 204-215.
- [6] M. A. Field. (1969). Rate of Combustion Of Size-Graded Fractions of Char from a Low Rank Coal between 1200 K-2000 K. *Combustion and Flame* 13, pp. 237-252.
- [7] M. M. Baum and P. J. Street. (1971). Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles. *Combust. Sci. Tech.* 3(5):231-243.
- [8] N.Punbusayakul (2004). *Numerical Simulation of Sulfur Dioxide Adsorption in a Vortex Flow Reactor*, Thesis of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- [9] อ่ำพล อาภาชนากร นิमित นิพัทธ์ธรรมกุล และ เฉลิมพงษ์ กล้าขยัน (2555). *โครงการนำร่องเพื่อผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวลในระดับชุมชน*, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน) และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน

ภาคผนวก ค.
สรุปการใช้จ่ายเงิน

บัญชี รับ-จ่าย (เงินงวดที่ 1)

วัน-เดือน-ปี	รายการ	เลขที่ อ้างอิง	เงินฝากธนาคาร		รวม
			รับ	จ่าย	
	งบประมาณ		513,900.00		
	(หัก) ค่าใช้จ่าย			514,036.24	
	งบประมาณคงเหลือ				- 136.24
	รับเงินสนับสนุนจาก วช 2/1		513,900.00		
1 ต.ค. 57	ค่าสกรู	CS5710-00025		970.47	
6 ต.ค. 57	ค่าเพลลา	IV57/06410		2,789.28	
5 พ.ย. 57	ค่าแผ่นสแตนเลส 304	IT14111036		33,747.80	
10 พ.ย. 57	ค่าท่อ / แผ่นสแตนเลส 304	IT14112071		31,993.00	
19 พ.ย. 57	ค่าไบเจียร์	074/3651		187.25	
20 พ.ย. 57	ค่าท่อเหล็ก	IV5703276		29,039.80	
21 พ.ย. 57	ค่าเหล็กแผ่น / เหล็กฉาก	IV5703283		30,377.30	
22 พ.ย. 57	ค่าเหล็กแผ่น / เหล็กฉาก / ท่อดำ	IV5703284		26,195.74	
22 พ.ย. 57	ค่าเหล็กฉาก	0114/05664		556.40	
24 พ.ย. 57	ค่าดอกสว่าน	0149/07407		278.20	
25 พ.ย. 57	ค่าเหล็กฉากทำชั้น	0117/05815		1,080.70	
25 พ.ย. 57	ค่าแก๊สออกซิเจน และสี	0117/05818		620.60	
2 ธ.ค. 57	ค่าไบเจียร์	075/3726		117.70	
10 ธ.ค. 57	ค่าแผ่นสแตนเลส 304	IT14122068		2,354.00	
11 ธ.ค. 57	ค่าเหล็กแผ่น หนา 6 mm	IV571200033		10,379.00	
22 ธ.ค. 57	ค่าถ่ายเอกสาร	57-01363		543.56	
24 ธ.ค. 57	ค่าจ้างเหมาฉนวนท่อเหล็ก			8,000.00	
24 ธ.ค. 57	ค่าจ้างเหมาฉนวนท่อไอเสีย หน้าแปลน ฉนวน			26,200.00	
8 ม.ค. 58	ค่าจ้างเหมาถังปูนเก็บน้ำงวด 1			7,000.00	
10 ม.ค. 58	ค่าจ้างเหมาติดตั้งระบบควบคุมมอเตอร์			30,000.00	
12 ม.ค. 58	ค่าอุปกรณ์ตู้ควบคุม	IV5801-108		9,520.33	
13 ม.ค. 58	ค่าจ้างหมางานถังพักน้ำ stainless			16,000.00	
13 ม.ค. 58	ค่าจ้างเหมาถังปูนเก็บน้ำงวด 2			7,000.00	
13 ม.ค. 58	ค่าหน้าแปลนเหล็ก	291/14520		3,195.02	
14 ม.ค. 58	ค่าสายสัญญาณ	IV5801-157		5,587.54	
21 ม.ค. 58	ค่าสาย VCT	IV5801-267		3,413.30	
27 ม.ค. 58	ค่า Blower	150011		59,171.00	
28 ม.ค. 58	ค่าสาย thermocouple	iv5801109		3,932.25	
28 ม.ค. 58	ค่าเหล็กแผ่น ท่อกลม	IV5800246		45,297.38	

วัน-เดือน-ปี	รายการ	เลขที่	เงินฝากธนาคาร		รวม
		อ้างอิง	รับ	จ่าย	
6 ก.พ. 58	ค่าแก๊ส LPG	565/40		600.00	
11 ก.พ. 58	ค่าสายไฟ	IV5802-160		607.76	
17 ก.พ. 58	ค่าน้ำมันแก๊สโซฮอล์	s58-38815		760.00	
23 ก.พ. 58	ค่าเหล็กกล่อง เหล็กฉาก	IV5800534		54,006.11	
24 ก.พ. 58	ค่าอุปกรณ์ PLC	0215HH008		62,514.75	
	รวม		513,900.00	514,036.24	- 136.24

บัญชี รับ-จ่าย (เงินงวดที่ 2)

วัน-เดือน-ปี	รายการ	เลขที่	เงินฝากธนาคาร		รวม
		อ้างอิง	รับ	จ่าย	
	งบประมาณ		1,199,100.00		1199100.00
	(หัก) ค่าใช้จ่าย			1,199,443.85	1,199,443.85
	งบประมาณคงเหลือ				-343.85
	รับเงินสนับสนุนจาก วช 2/2		1,199,100.00		-
1 ต.ค. 57	ค่าท่อทองแดง	197/09836		1,108.52	
4 ก.พ. 58	ค่าแผ่นสแตนเลส	IV580200012		6,313.00	
11 ก.พ. 58	ค่าเบรคเกอร์	IV5802-161		107.00	
25 ก.พ. 58	ค่าแก๊ส LPG	039/01922		800.00	
25 ก.พ. 58	ค่าเหล็กแผ่น	IV58/01293		3,216.42	
27 ก.พ. 58	ค่าเฟือง	099/4944		4,654.50	
27 ก.พ. 58	ค่าอุปกรณ์ท่อสแตนเลส	HS2015022709		23,885.61	
27 ก.พ. 58	ค่าเหล็กแผ่น	HS2015022710		34,856.32	
2 มี.ค. 58	ค่าเหล็ก	IV5800610		32,372.85	
2 มี.ค. 58	ค่าเหล็กกล่อง วิวาบอร์ด	091/4455		3,370.50	
9 มี.ค. 58	ค่าเหล็กแผ่น	IV58/01578		1,585.74	
17 มี.ค. 58	ค่าชุดต่อท่อทองเหลือง	0234/11699		578.87	
17 มี.ค. 58	ค่าเพลสแตนเลส	IT15033116		829.25	
18 มี.ค. 58	ค่าแผ่นสแตนเลส	5803066		6,420.00	
18 มี.ค. 58	ค่าแผ่นสแตนเลส	5803067		10,914.00	
23 มี.ค. 58	ค่าท่อกลม เหล็กแผ่นลาย	IV5800857		17,269.80	
24 มี.ค. 58	ค่าลูกเซอร์กิต	IV5803-420		1,525.82	
24 มี.ค. 58	ค่า NUT ประกันยาง	0243/12128		806.78	
25 มี.ค. 58	ค่า NUT ประกันทนไฟ	0244/12186		1,514.05	
1 เม.ย. 58	ค่าจ้างเหมางานระบบบำบัด 3			32,200.00	
3 เม.ย. 58	ค่าจ้างเหมาติดตั้งระบบปรับอากาศ			5,300.00	
3 เม.ย. 58	ค่าใบตัด สายแก๊ส	0256/12776		493.27	
3 เม.ย. 58	มู่เล่	017/0833		749.00	
6 เม.ย. 58	ปั้มหอยโข่ง	IV0024125		4,494.00	
8 เม.ย. 58	ค่าเหล็กกล่อง	IV5801026		42,800.00	
8 เม.ย. 58	ค่าสปริงลาน	55/2737		1,284.00	
8 เม.ย. 58	ค่าแผ่นสแตนเลส	073/3637		642.11	
8 เม.ย. 58	ค่าข้อต่อท่อ	023/1106		449.40	
10 เม.ย. 58	ค่าจ้างเหมางานระบบบำบัด สุดท้าย			27,500.00	
10 เม.ย. 58	ค่าท่อประปา			4,494.00	
10 เม.ย. 58	ค่าลวดเชื่อม	0264/13187		941.60	
11 เม.ย. 58	ค่าเหล็กแผ่น	IV5804-00044		256.80	

วัน-เดือน-ปี	รายการ	เลขที่	เงินฝากธนาคาร		รวม
		อ้างอิง	รับ	จ่าย	
17 เม.ย. 58	ดอกสว่าน	0266/13270		2,000.90	
24 เม.ย. 58	ค่าเหล็กแผ่น เหล็กฉาก	IV5801164		16,050.00	
28 เม.ย. 58	ค่าวาล์วแก๊ส	088/4385		572.45	
29 เม.ย. 58	ค่าเหล็กแผ่น	IV5804-0105		1,562.20	
1 พ.ค. 58	ค่าซิลิโคน	0282/14070		449.40	
1 พ.ค. 58	ค่าอุปกรณ์ pump ลม	0282/14069		6,332.26	
1 พ.ค. 58	ค่าจ้างทำโครงสร้างเตาเผา			21,000.00	
6 พ.ค. 58	ค่าซื้อท่อทองเหลือง	0287/14337		1,059.30	
16 พ.ค. 58	ค่าวงกบประตู	0063/03111		16,590.00	
18 พ.ค. 58	ค่าพัดลมระบายอากาศ	0063/03110		6,294.00	
24 พ.ค. 58	ค่าสแตนเลส	0063/03108		3,670.00	
26 พ.ค. 58	ค่าถังเก็บน้ำ และปั๊มน้ำ	IV58-00956		9,500.00	
27 พ.ค. 58	ค่าฟิวเจอร์คัลเลอร์	SC58050672		4,340.01	
28 พ.ค. 58	ค่าแผ่นสังกะสี	IV5805053		10,789.02	
29 พ.ค. 58	ค่าเชิงชาย	0063/03109		3,207.00	
30 พ.ค. 58	ค่าแผ่นสังกะสี	IV5805060		10,707.28	
30 พ.ค. 58	ค่าสุขภัณฑ์	004-362557		1,670.00	
8 มิ.ย. 58	ค่าแผ่นสังกะสี	IV5806013		3,223.38	
11 มิ.ย. 58	ค่าอุปกรณ์ปรับแต่งคอมพิวเตอร์	580611003		16,000.00	
11 มิ.ย. 58	ค่าก๊อมน้ำ	002-232114		829.00	
14 มิ.ย. 58	ค่ากระเบื้อง	IVFDC10515060016		6,140.00	
15 มิ.ย. 58	ค่าอุปกรณ์สแตนเลส	BNA150690511		1,363.00	
17 มิ.ย. 58	ค่าแรงจ้างเหมาสร้างชุดลำเลียงเชื้อเพลิง			98,650.00	
21 มิ.ย. 58	ค่าประตู	BNA150692527		4,400.00	
22 มิ.ย. 58	ค่าราวแขวนสแตนเลส	004-368237		485.00	
23 มิ.ย. 58	ค่าฉนวนกันความร้อน	IN15-43173		3,976.06	
23 มิ.ย. 58	ค่าลูกบิดประตู	004-368492		229.00	
23 มิ.ย. 58	ค่าบอလာลว	003-317786		954.00	
25 มิ.ย. 58	ค่ากระเบื้อง	IVFDC10515060036		8,280.00	
25 มิ.ย. 58	ค่ากระเบื้อง	IVFDC10515060035		7,560.00	
26 มิ.ย. 58	ค่าสุขภัณฑ์	005-327526		1,847.00	
3 ก.ค. 58	ค่ากลอน ตัวล็อก	003-319735		260.00	
15 ก.ค. 58	ค่าจ้างเหมาระบบป้อนอากาศ			68,500.00	
15 ก.ค. 58	ค่าจ้างเหมาระบบป้อนเชื้อเพลิง			65,200.00	
21 ก.ค. 58	ค่าแรงจ้างเหมาออกแบบ และสร้างระบบห้องเผาไหม้ช่วย			94,300.00	

วัน-เดือน-ปี	รายการ	เลขที่	เงินฝากธนาคาร		รวม
		อ้างอิง	รับ	จ่าย	
25 ก.ค. 58	จ้างเหมางานติดตั้งระบบส่งกำลัง	580725		74,900.00	
28 ก.ค. 58	จ้างเหมางานระบบบำบัดไอเสีย			72,000.00	
10 ส.ค. 58	จ้างเหมางานติดตั้งระบบส่งกำลัง	580810		74,900.00	
4 ก.ย. 58	ค่าจ้างทำเครื่องบดพร้อมตู้ควบคุม			90,000.00	
15 ก.ย. 58	ค่าลม	098/4864		214.00	
16 ก.ย. 58	ค่าใบตัด	129/6449		331.70	
17 ก.ย. 58	ค่าเหล็ก	097/4815		963.00	
18 ก.ย. 58	ค่าแผ่น sus316	5809112		20,116.00	
29 ก.ย. 58	ค่าเหล็กเส้นกลม	IV5809-1000		17,940.05	
29 ก.ย. 58	ค่าเหล็กข้ออ้อย	IV5809-999		76,355.63	
	รวม		1,199,100.00	1,199,443.85	-343.85

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

1. ประวัติส่วนตัว

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายจารุวัตร เจริญสุข
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) jaruwat charoensuk
ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์
หน่วยงาน และสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่ 3/2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์ 0-23298351
โทรสาร 0-23298352 มือถือ 081 6177658
Email: kcjaruw@kmitl.ac.th และ jaruwat_c@hotmail.com

2. ประวัติการศึกษา

- ระดับมัธยม, โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนีย์)
- วศ.บ. (เกียรตินิยมอันดับ2) วิศวกรรมเครื่องกล สจล. ปี พ.ศ. 2534
- Ph.D. (Mech. Eng.) Imperial College, University of London, United Kingdom, January 1996

3. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

- การเผาไหม้
- Computational Fluid Dynamics

4. ภาระงานสอน

- Engineering Computation
- Computational Fluid Mechanics
- Mechanics of Machinery

5. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งภายใน และภายนอกประเทศ

5.1 โครงการวิจัย และการบริการวิชาการ

งานวิจัยที่ทำสำเร็จแล้ว

- หัวหน้าโครงการ: การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการก่อตัวของก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินผง สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ในปี 2540 ถึง 2542
- หัวหน้าโครงการ: โครงการ พัฒนาเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก เพื่อเป็นต้นกำลังงานกลสำหรับห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล สนับสนุนงานวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ในปี 2543 ถึง ปี พ.ศ. 2545
- หัวหน้าโครงการ: โครงการ การพัฒนาหัวเผ้าน้ำมันพืชใช้แล้วสำหรับผู้ประกอบการอาหารทอด สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ในปี พ.ศ. 2545 ถึง พ.ศ. 2547

- หัวหน้าโครงการ: โครงการ การประยุกต์ใช้น้ำมันพืชใช้แล้วในเครื่องยนต์กั้นกันก๊าซขนาดเล็ก คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีงบประมาณ 2553

- หัวหน้าโครงการ: โครงการการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตด้วยวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมแบบไร้ระเบียบ รหัสโครงการ MT-B-52-MAC-22-189-G ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2552-2553

- หัวหน้าโครงการ: โครงการถ่ายเทเทคโนโลยีการผลิตหม้อน้ำ สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม (ภายใต้ค่าใช้จ่ายในการศึกษาและพัฒนาระบบการบริหารจัดการโรงงาน) ปีงบประมาณ 2553

- ที่ปรึกษาโครงการ: โครงการพัฒนาประสิทธิภาพโรงงานน้ำตาลด้านต้นกำลังหม้อน้ำ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม

- นักวิจัย: โครงการ การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตั้งแต่ปี พ.ศ.2544 ถึง พ.ศ. 2549

- นักวิจัย: โครงการ การพัฒนาระบบประกอบห่อเซลล์ การจัดการทางความร้อนและ ไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง ในปี พ.ศ. 2549 ถึงปี พ.ศ. 2552

- นักวิจัย: โครงการ วิจัยและพัฒนาวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการปฏิรูปของเอทานอล พ.ศ. 2555 ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

- นักวิจัย: การปรับสภาพเอทานอลชีวภาพสำหรับเป็นเชื้อเพลิงในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (พ.ศ.2549-2555)

- นักวิจัย: Research and Development on Production of Hydrogen via Ethanol Steam Reforming พ.ศ. 2555 ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จัดโดย บริษัท ไทยออยล์ จำกัด

- หัวหน้าโครงการ: การพัฒนาข้อมูลสัมประสิทธิ์ทางอากาศพลศาสตร์ของกระสุนปืนใหญ่ขนาด 105 mm. ด้วยการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

- หัวหน้าโครงการ: การพัฒนาสิ่งประดิษฐ์หัวเผาใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว สำหรับวิสาหกิจชุมชนยะลา กองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งานวิจัยที่กำลังทำ

- ที่ปรึกษาโครงการ: การพัฒนา และ ทดสอบสมรรถนะ หัวเผาก๊าซสำหรับ Cracking furnace บริษัท SCG Chemicals จำกัด

สถานะภาพการทำวิจัย	กำลังดำเนินโครงการก้าวหน้า 70 %
เวลาที่ใช้ในการดำเนินโครงการ	3 ชั่วโมง/สัปดาห์
ระยะเวลาดำเนินงาน	8 เดือน

- หัวหน้าโครงการ: การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น สภาวิจัยแห่งชาติ งบประมาณ ปี 2557 - 2558

สถานะภาพการทำวิจัย	กำลังดำเนินโครงการก้าวหน้า 70 %
เวลาที่ใช้ในการดำเนินโครงการ	6 ชั่วโมง/สัปดาห์
ระยะเวลาดำเนินงาน	24 เดือน

5.2 ที่ปรึกษาปริญญาโทระดับปริญญาโท:

การพัฒนาเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก เพื่อเป็นต้นกำลังงานกลสำหรับห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล

จำนวนนักศึกษาในความดูแล 7 คน

เวลาที่ใช้ในการให้คำปรึกษา 6 ชั่วโมง/สัปดาห์

5.3. ที่ปรึกษาปริญญาโทระดับปริญญาเอก:

- การเผาไหม้ของน้ำมันพืชในวัสดุพูน

- Low NOx burner development for cracking furnace

- Design of Low speed propeller for local fisher boat in Thailand

จำนวนนักศึกษาในความดูแล 3 คน

เวลาที่ใช้ในการให้คำปรึกษา 6 ชั่วโมง/สัปดาห์

5.4 ผลงานวิจัยที่เคยตีพิมพ์

ผลงานวิชาการ

ระหว่างศึกษาระดับปริญญาเอก

1. **Charoensuk J.**, Godoy S. and Lockwood F.C., Partial segregation by size towards low NOx burner design, EPRI/EPA 1995, Joint Symposium on Stationary Combustion Nox control, Kansas City, Missouri, 1995
2. **Charoensuk J.** and Lockwood F.C., Effect of scale on combustion and Nox formation characteristics in Coal-Fired furnace, 3rd International Conference on combustion, 1995
3. Abbas T., **Charoensuk J.**, Costen P. and Lockwood F. C., The Performance of pulverised-coal frame in a simulated combined cycle unit, Combustion and Flame, Vol. 3, No. 1, p.111-123, 1997

ผลงานวิจัยหลังการสำเร็จการศึกษา

(ก) ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 10 ฉบับ

4. N. Punbusayakul, **J. Charoensuk**, B. Fungtammasarn, Modified Sulfation Model for Simulation of Pulverized Coal Combustion, Energy Conversion and Management 47 (2006) 253–272_ Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.enconman.2005.03.006
5. M. Masomtop, K. Wongtida, **J. Charoensuk**, S. Charojrochkul, Improved Electrical Conducting Wires for SOFCs, Advanced Materials Research Vols. 55-57, October 2008, p 797-800.
6. M. Masomtop, K. Wongtida, K. Hanamura, **J. Charoensuk** and S. Charojrochkul, “High Temperature Behaviour of Contact Interface for Ag and Au with Stainless Steel 316L”, Journal of Metals, Materials and Minerals, 18[2] (2008) 71-75

7. N. Punbusayakul, W. Wongklang, K.Wongtida, **J. Charoensuk**, S. Charojrojkul, Behavior of Various Glass Seal For Planar Solid Oxide Fuel Cell, Vols. 55-57, October 2008, p 817-820.
8. Passakorn Vessakosol, **Jarrewat Charonsuk**, Numerical analysis of heat transfer and flow field around cross-flow heat exchanger tube with fouling, Applied Thermal Engineering, February, 2010.
9. **Jarrewat Charoensuk**, Passakorn Vessakosol, A higher order Finite Element Procedure for Transient Heat Conduction Analysis of Functionally Graded Material, Heat and Mass Transfer, doi 10.1007/s00231-010-0649-8, December 2010, Volume 46, Numbers 11-12, Pages 1261-1276
10. **Jarrewat Charoensuk**, Passakorn Vessakosol, Numerical solutions for functionally graded solids under thermal and mechanical loads using a high-order control volume finite element method, Applied Thermal Engineering, 2011, Volume 31, Page 213-227, doi:10.1016/j.applthermaleng.2010.09.0001
11. **Jarrewat Charoensuk**, Arwut Lapidattanakul, "On flame stability, temperature distribution and burnout of air-staged porous media combustor firing LPG with different porosity and excess air", Applied Thermal Engineering, 2011(May 2011) doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.04.042 Key: citeulike:9373703
12. Nitinai Punbusayakul, Krisada Boonsiri, Sumittra Charojrochkul, Bundit Fungtammasan, **Jarrewat Charoensuk**, "Assessment on Hermetic Property and Mechanical Compatibility of Various Groove-Gasket Sealing Designs for Solid Oxide Fuel Cell Stack", Journal of Power Sources, 2012, doi:10.1016/j.jpowsour.2012.04.01
13. Kitisak Suddoung, **Jarrewat Charoensuk** and Nuttawit Wattanasakulpong, "Application of the differential transformation method to vibration analysis of stepped beams with elastically constrained ends", Journal of Vibration and Control, 11 September 2012, doi: 10.1177/1077546312456581
14. Kitisak Suddoung, **Jarrewat Charoensuk** and Nuttawit Wattanasakulpong, "Vibration response of stepped FGM beams with elastically end constraints using differential transformation method" APPLIED ACOUSTICS 77:20–28 · MARCH 2014
15. N. Poyoo, S. Kumar, **J. Charoensuk**, A. Suksangpanomrung, "Numerical simulation of cylindrical heat pipe considering non-Darcian transport for liquid flow inside wick and mass flow rate at liquid-vapor interface", INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER 70(20):965 - 978 · MARCH 2014
16. Nuttawit Wattanasakulpong, **Jarrewat Charoensuk**, "Vibration Characteristics of Stepped Beams Made of FGM Using Differential Transformation Method" *Meccanica* , April 2015, Volume 50, Issue 4, pp 1089-1101

(ข) ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 16 ฉบับ

17. Wassachol Wattana, Niwat Nakayothinsakul, Sumitra Charojrochkul, **Jarruwat Charoensuk**, “Experimental and Modeling Study on Flow Behavior in a Fuel Cell Stack”, The 15th International Symposium on Transport Phenomana, Bangkok 10-12 May 2004
18. Niwat Nakayothinsakul, Wassachol Wattana, **Jarruwat Charoensuk**, Sumitra Charojrochkul, “Modeling of Manifold aerodynamics for Solid Oxide Fuel Cells” The International Conferencs with Exhibition, Lucerne Fuel Cell Forum 2004, 28th June – 2nd July 2004, Lucerne Switzerland
19. W. Wattana, **J. Charoensuk**, N. Phoocharoen and S. Charojrochkul, Non-reacting Flow Distributions under Various SOFC Stack Configurations” Solid Oxide Fuel Cells 10, The Electrochemical Society. The Tenth International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (SOFC-X), Nara, Japan, June 3-8, 2007.
20. P. Vessakosol , **J. Chareonsuk** , Thavee Teschareon, A finite volume method for an analysis of transient heat conduction in functionally graded materials, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science 2009, ICCES-09 Phuket Thailand , 8-13 April 2009
21. Winit jaiboon, Niwat Phoocharoen, Seiji Okawa, **Jarruwat Chareonsuk**, Simulation of Flow Aerodynamics and Heat Transfer in a Plate-Fin Radiator, 13th Annual Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE 13)
22. Keerasut Suttanarak, Nirut Naksuk and **Jarruwat Charoensuk**, Effect of Co and Counter Flow to Transport Phenomena for Proton Exchange Membrane Fuel Cell by Numerical Simulation, 13th Annual Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE 13)
23. Keerasut Suttanarak, Nirut Naksuk and **Jarruwat Charoensuk**, Numerical Investigation on Water and Heat Generation in Proton Exchange Membrane Fuel Cell, The 2nd Thammasat University International Conference on Chemical, Environmental and Energy Engineering (TU-ChEEE2009)
24. Winit jaiboon, Niwat Phoocharoen, Seiji Okawa, **Jarruwat Chareonsuk**, Numerical investigation of fluid flow and heat transfer in a plate-fin radiator, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science 2009, ICCES-09 Phuket Thailand , 8-13 April 2009
25. P. Vessakosol , **J. Chareonsuk** , Thavee Teschareon, A finite volume method for an analysis of transient heat conduction in functionally graded materials, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science 2009, ICCES-09 Phuket Thailand , 8-13 April 2009

26. Arwut Lapidattanakul, Kasemsil Onthong and **Jarrewat Charoensuk**, Development of Used Vegetable Oil Burner using Porous Media, World Renewable Energy Congress 2009 –Asia The 3rd International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2009) 18-23 May 2009, Bangkok Thailand
27. G. Pornsopin, N. Punbusayakul, T. Uttamote, K. Hanamura, S. Charojrochkul, and **J. Charoensuk**, “Study Behaviour of CO₂ Absorption in Packed Bed Column from Synthesis Biogas to Produce Hydrogen for SOFC Operation” The International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009, December 2 – 4, 2009, Chiang Rai
28. Niwat Suksam, Sumittra Charojrockul and **Jarrewat Charoensuk** “Numerical Simulation of a Segmented-Cell-in-Series Planar SOFC” The International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009, December 2 – 4, 2009, Chiang Rai
29. Punbusayakul N., Charojrochkul S., **Charoensuk J.**, and Fungtammasan B., “Effect of Load Distribution Patterns on a Non-Rigid-Body Interconnector Under Loading Condition of Planar Solid Oxide Fuel Cell” FC09 The International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009, December 2 – 4, 2009, Chiang Rai
30. Vuthipong Junkree and **Jarrewat Charoensuk** “The Mathematical model for optimization condition to prevent H₂SO₄ condensation in heat recovery equipments of natural gas fired power plant” The International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009, December 2 – 4, 2009, Chiang Rai
31. Vuthipong Junkree and **Jarrewat Charoensuk**, "H₂SO₄ Acid Dew Point Temperature Estimation To Avoid Corrosion On Heat Recovery Equipments In A Natural Gas Fired Power Plant", Proceedings of the 11th International Colloquium on Environmentally Preferred Advanced Power Generation, February 8-10, 2011, Costa Mesa, California, USA
32. Dachdanai Boonchaui, Kittipass Wasinarom, Monthol Chamsab and **Jarrewat Charoensuk**, "Computational investigation of quantitative entropy generation in centrifugal compressors with different exit beta angle" The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering, 19-21 October, 2011, Krabi
33. Thanaphat Phakdee worrawong , **Jarrewat Charoensuk**, "Numerical Investigation on the effect of char reactivity factors and wall temperature on burning characteristic of pulverized fuel fired combustor", Internatoinal Conference on Advance in Electrical and Mechanical Engineering (ICAEME 2012) 18-19 December, Phuket Thailand.
34. Kasemsil Onthong , Kittipass Wasinarom , Kridsada Boonsiri , Jarrewat Charoensuk, “Experimental and Equilibrium modeling Investigation of rice husk Stratified downdraft gasifier”, The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering, p.69, 17-19th Dec., 2014, Chiang Mai Thailand

35. Keerasut Suttanarak, Jaruwat Charoensuk, “Numerical Investigation on heat and water transport in PEM fuel cell”, The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering, p.80, 17-19th Dec., 2014, Chiang Mai Thailand.
36. Niwat Suksam, Jaruwat Charoensuk, “CFD Study on the Combustion Performance of a Biogas Fueled Burner””, The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering, p.19, 17-19th Dec., 2014, Chiang Mai Thailand.

(ค) ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารที่ประชุมระดับชาติ จำนวน 43 ฉบับ

37. ขนิษฐา สุตพันธ์, จารุวัตร เจริญสุข, สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ, ธันวาคม 2541,โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อออกแบบ ระบบสูบน้ำ ในงานระบายน้ำ , วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 หน้า 52 สิงหาคม 2541
38. Jaruwat Charoensuk, “Dimensional analysis of flow , combustion and heat transfer in industrial combustors” งานสัมมนาวิชาการ วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พฤศจิกายน 2541
39. จารุวัตร เจริญสุข วิภู ศรีสืบสาย “การแก้ปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในท่อกลม ด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม” งานสัมมนาวิชาการ วิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 12 จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, พฤศจิกายน 2541
40. จารุวัตร เจริญสุข ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ “การประยุกต์ วิธี Finite Volume กับการจำลองการไหลในท่อขยายอย่างฉับพลัน” งานสัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 12 จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย พฤศจิกายน 2541
41. จารุวัตร เจริญสุข ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของการเกิดออกไซด์ ของ กำมะถันจากการเผาไหม้ ของถ่านหินผง” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 กันยายน 2542
42. จารุวัตร เจริญสุข วิภู ศรีสืบสาย “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์” งานสัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ธันวาคม 2542
43. จารุวัตร เจริญสุข กนกอร รณากิจ “อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันในการฉีดต่อการไหลของพลาสมาพลาสมาพลาสมา” งานสัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ธันวาคม 2542
44. จารุวัตร เจริญสุข เมธี ใบงาม “แบบจำลองการฉีดพลาสมาในสถานะของเหลว” งานสัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ธันวาคม 2543
45. จารุวัตร เจริญสุข อภิษฐ์ สอนตระกูล “การจำลองการไหลและถ่ายเทความร้อนสำหรับการทำนายการหดตัวและการบิดงอของพลาสติกในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด” งานสัมมนาวิชาการ วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ธันวาคม 2543
46. จารุวัตร เจริญสุข อรรถพร ผาบเพ็ง “โปรแกรมคำนวณการไหลเบื้องต้นโดยวิธีการปริมาตรสลับเนื่อง” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 17 ฉบับที่ 3 กันยายน 2543
47. นิธินัย ปัญญาบุษกุล จารุวัตร เจริญสุข “การจำลองผลของตำแหน่งฉีดต่อเส้นทางเดินอนุภาคในขบวนการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 17 ฉบับที่ 3 กันยายน 2543

48. สนธยา มิเลียง จารุวัตร เจริญสุข "การศึกษาผลกระทบของขนาดต่อเส้นทางเดินของอนุภาคเคลเซียมคาร์บอเนตในห้องเผาไหม้ถ่านหินผง" วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 17 ฉบับที่ 3 กันยายน 2543
49. นิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล จารุวัตร เจริญสุข ผลกระทบของสภาวะที่ทางเข้าต่อการผสมแบบปั่นป่วนในเตาเผาทรงกระบอก วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 17 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2543
50. ภาสกร เวสสะโกศล จารุวัตร เจริญสุข "การประยุกต์วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์รูปร่างสี่เหลี่ยมสำหรับปัญหาการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อน" วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 มิถุนายน 2544
51. ภาณุมาศ อรุณเดชาวัฒน์ จารุวัตร เจริญสุข "การปรับปรุงห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซชนิดส่วนผสมอากาศเชื้อเพลิง หนา บาง สำหรับเชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำ" วิศวกรรมสาร มก. ฉบับที่ 50 สิงหาคม-พฤศจิกายน 2546
52. จารุวัตร เจริญสุข อรรณพ ผาบเพ็ง "การประยุกต์ใช้หัวเผาน้ำมันพีชในเชิงอุตสาหกรรมโดยใช้วัสดุพูน" วิศวกรรม ลาดกระบัง ปีที่ 20 ฉบับที่ 2 เดือน มิถุนายน 2546
53. จารุวัตร เจริญสุข สนธยา มิเลียง "การศึกษาผลกระทบสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงด้านสมรรถนะของหัวเผาน้ำมันมะพร้าว" วิศวกรรม ลาดกระบัง ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 เดือน มิถุนายน 2545
54. สุรัชย์ จิงจตุพรชัย จารุวัตร เจริญสุข "การเปรียบเทียบสมรรถนะของหัวเผาน้ำมันพีชเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ในครัวเรือน" วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 เดือน มิถุนายน 2545
55. สมัชชา โชคชัยวิวัฒน์ จารุวัตร เจริญสุข และ ยุทธนา ธนุสร "การศึกษาการแก้ปัญหาของการเกิด Weld line และ Sink Mark ในการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีดโดยใช้โปรแกรม Moldex" การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16 14-16 ตุลาคม 2545 จังหวัดภูเก็ต
56. จารุวัตร เจริญสุข นิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล นิวัฒน์ ภูเจริญ "การจำลอง การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์ด้วยเทคนิควัสดุพูน" การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัด ปราจีนบุรี
57. จารุวัตร เจริญสุข นิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล นิวัฒน์ ภูเจริญ "การจำลองการไหลของอากาศผ่านใบพัดหม้อน้ำด้วยวิธีหลายแกน" การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัด ปราจีนบุรี
58. กฤษณ์ เรืองพยุศักดิ์ จารุวัตร เจริญสุข "การใช้น้ำมันชีวภาพที่สกัดจากกากของเสียในเครื่องยนต์ดีเซล" การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัด ปราจีนบุรี
59. วิษรสรรค์ โชคชัยวิวัฒน์ จารุวัตร เจริญสุข "อิทธิพลของเงื่อนไขการทำงานต่อการเกิดรอยประสานและรอยยุบในการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีด" วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 20 ฉบับที่ 3 กันยายน 2546
60. นิตินัย ปัญญาบุศยกุล จารุวัตร เจริญสุข "ผลกระทบของ residence time ของอนุภาคเคลเซียมคาร์บอเนตต่อกระบวนการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์" วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 20 ฉบับที่ 3 กันยายน 2546
61. นิตินัย ปัญญาบุศยกุล จารุวัตร เจริญสุข "อิทธิพลของตำแหน่งฉีดอนุภาค CaCO_3 และ Bluff Body ต่อ Residence Time ของกระบวนการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์" วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2547

62. ภาณุมาศ อรุณเดชาวัฒน์ จารุวัตร เจริญสุข “การศึกษาเชิงทดลอง ของการไหลหมุนวนเป็นเกลียว ภายในบริเวณปฐมภูมิของแบบจำลองห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ” การประชุมและการสัมมนาทางวิชาการ องค์การเครือข่ายวิศวกรรมการบินและอวกาศ ครั้งที่ 2 ประจำปี 2547 18-19 สิงหาคม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
63. จารุวัตร เจริญสุข สุรพันธ์ ชงไชยะ “หัวเผาแบบพรมเผาไหม้น้ำมันพืช” วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน สิงหาคม 2548
64. Jaruwat Charoensuk, Wee Chabthanom, “Computation of Isothermal Swirling Flows in a Combustor Using Modified Dissipation Equation k- ϵ Models” The 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand 19-21 October 2005, Phuket, Thailand
65. มานพ มาสมทบ จารุวัตร เจริญสุข วิภา เจียรระโนวชิระ แสงว เกิดประทุม “ผลกระทบของรูปทรงใบพัดที่มีผลต่อการเติมอากาศใต้น้ำ” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19 19-21 ตุลาคม 2548 จังหวัดภูเก็ต
66. นาดยา เจริญสุข จารุวัตร เจริญสุข “การพัฒนาชุดอ่อนเชื้อเพลิงแบบหัวเผาสำหรับน้ำมันปาล์ม” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19 19-21 ตุลาคม 2548 จังหวัดภูเก็ต
67. บุญส่ง เพ็ชรน้อย จารุวัตร เจริญสุข “การพัฒนาและประเมินสมรรถนะหัวเผาน้ำมันปาล์มชนิดผสมอากาศก่อนเผาไหม้” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19 19-21 ตุลาคม 2548 จังหวัดภูเก็ต
68. นิตินัย ปัญญาบุศยกุล มานพ มาสมทบ ปวิวัติ อ่อนพุทธา จารุวัตร เจริญสุข สุมิตรา จรสโรจน์กุล “อิทธิพลของความดันทางเข้าของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัดปทุมธานี
69. อาวุธ ลภีรัตนกุล จารุวัตร เจริญสุข “เตาเผาไหม้วัสดุพรมกับเตาเผาไหม้แบบหมุนวน (part1) ” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัดปทุมธานี
70. อาวุธ ลภีรัตนกุล จารุวัตร เจริญสุข “เตาเผาไหม้วัสดุพรม part 2 : อิทธิพลของอากาศส่วนเกิน” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัดปทุมธานี
71. นิวัฒน์ ภูเจริญ ทวี เทศเจริญ และ จารุวัตร เจริญสุข “การจำลองเชิงตัวเลขของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบโลหะรองรับ” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัดปทุมธานี
72. นิวัฒน์ สุกสาม สุมิตรา จรสโรจน์กุล จารุวัตร เจริญสุข “การจำลองเชิงตัวเลขสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5 29 เมษายน-1 พฤษภาคม 2552 มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก
73. อาวุธ ลภีรัตนกุล เกษมศิลป์ อ่อนทอง และจารุวัตร เจริญสุข “การพัฒนาหัวเผาน้ำมันปาล์มใช้แล้วด้วยเทคนิควัสดุพรม” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5 29 เมษายน-1 พฤษภาคม 2552 มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก

74. กิตติภาส วศินารมณฺ์ นิวัฒน์ ภูเจริญ และ จารุวัตร เจริญสุข “การวิเคราะห์ทางความร้อนและการประเมินสมรรถนะเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 4-7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่
75. อาวุธ ลภีรัตนากุล, จารุวัตร เจริญสุข “หวั้เผาวัสดุพุนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้นและหวั้เผาวัสดุพุนแบบจ่ายอากาศเป็นชั้น” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่
76. กันตณ อุทุมโชคปิติ จำลอง ปราบแก้ว จารุวัตร เจริญสุข “การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการประยุกต์เพื่อพัฒนาเจ็ทปั๊มสำหรับการขนถ่ายอนุภาคถ่านหินผง” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่
77. นิติชัย ปัญญาบุศยกุลวิทยา วงษ์กลางสุมิตรา จรัสโรจน์สกุลจารุวัตร เจริญสุขและ บัณฑิต พงษ์ธรรมสาร “การออกแบบและพัฒนาจุดเชื่อมต่อของอินเตอร์คอนเน็กเตอร์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่
78. เกษมศิลป์ อ่อนทอง ทวี เทศเจริญ และ จารุวัตร เจริญสุข “อิทธิพลรูปทรงของวัสดุสร้างความพุนที่ส่งผลต่อสมรรถนะหวั้เผาน้ำมันปาล์มใช้แล้ว” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่
79. อรรถสิทธิ์ สวนจันทร์ ดำริห์ จันทร์แสงสุข จารุวัตร เจริญสุข “อิทธิพลของจำนวนไบเบลด ต่อสมรรถนะปั้มน้ำหอยโข่ง” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่
80. ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนากุล, จารุวัตร เจริญสุข "การพัฒนาระบบหวั้ฉีดยของหวั้เผาก๊าซแอลพีจีในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ : Part 1" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (ME-NETT 25) 19 ตุลาคม 2554 รหัสบทความ AEC 18
81. อาวุธ ลภีรัตนากุล, จารุวัตร เจริญสุข "การศึกษาความสามารถในการหวั้เร่งเชื้อเพลิงของหวั้เผาแอลพีจีแบบกึ่งอัตโนมัติที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ : Part 2" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (ME-NETT 25) 20 ตุลาคม 2554 รหัสบทความ AEC 39
82. นิติชัย ปัญญาบุศยกุล ฤทธา บุญศิริ จารุวัตร เจริญสุข สุมิตรา จรัสโรจน์กุล "การศึกษาการฉีกด้วยแรงกดด้วยคอนดักทีฟซิลเวอร์เพนท์และไมก้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (ME-NETT 25), 20 ตุลาคม 2554, รหัสบทความ ETM 63
83. ฤทธา บุญศิริ นิติชัย ปัญญาบุศยกุล จารุวัตร เจริญสุข สุมิตรา จรัสโรจน์กุล "การศึกษาพฤติกรรมของวัสดุฉนวนเชิงประกอบแก้วแบบเสริมเส้นใยสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (ME-NETT 25) 20 ตุลาคม 2554 รหัสบทความ ETM 67
84. มณฑล ฉ่ำทรัพย์เดชณัย บุญช่วย กิตติภาส วศินารมณฺ์ จารุวัตร เจริญสุข "มุมมองทางเข้าที่ส่งผลต่อสมรรถนะกังหันแก๊สแนวรัศมี" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (ME-NETT 25) 19 ตุลาคม 2554 รหัสบทความ TSF 17

85. เดชดนัย บุญช่วย กิตติภาส วศินารมณ มณฑล ฉ่ำทรัพย์ จารุวัตร เจริญสุข "อิทธิพลความยาวของ Splitter Blade ในคอมเพรสเซอร์แบบแรงเหวี่ยงสำหรับเครื่องยนต์กังหันแก๊สขนาดเล็ก" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (ME-NETT 25), 20 ตุลาคม 2554, รหัสบทความ TSF 19
 86. พงศธร ปู่ย่า จารุวัตร เจริญสุข การทดสอบหาตัวเลขสแควร์ของเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวนสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงผง" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (ME-NETT 25) 20 ตุลาคม 2554 รหัสบทความ TSF 46
 87. อาวุธ ลภีรัตนากุล ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนากุล วทีญญ ไพโรจน์ และ จารุวัตร เจริญสุข "การเปรียบเทียบการทำงานของหัวเผาแอลพีจีก่อนและหลังปรับปรุง : ลักษณะลำเจ็ทของ เชื้อเพลิงและสมรรถนะของหัวเผา", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 (ME-NETT 26) ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย AEC 2012
 88. Thanaphat Phakdeeworrawong, Chinnapat Turakarn, Jarruwat Charoensuk, "The Application of Mathematical Simulation for Pulverized Coal Combustion to Biomass Burners Design", The 27th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, Pataya Chonburi, 2013, p. 44-45
 89. Chinnapat Turakarn, Thanaphat Phakdeeworrawong, Jarruwat Charoensuk, "The Investigation on Operation Range of Biomass Pulverized Burner with 90 Degrees of Outlet Wall Angle", The 28th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, 2014, Khon Kean, Thailand, p. 69.
- (จ) ผลงานทางวิชาการในลักษณะอื่นๆ
1. สิ่งประดิษฐ์ “เครื่องแยกผลปาล์มจากทะลาย ชนิดถังกลมและฐานหมุน” จำลอง ปราบแก้ว, จารุวัตร เจริญสุข และ ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ “ผลงานดีเด่น สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปี พ.ศ.2545 ได้รับอนุสิทธิบัตร เลขที่ 1339 เมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม 2546 และได้เผยแพร่ใน วารสารสมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, ปีที่ 2 เล่มที่ 3 ประจำเดือน กุมภาพันธ์- มีนาคม 2546 , วารสาร UP DATE, ปีที่ 18 ฉบับที่ 185 ประจำเดือน มกราคม 2546. และจดหมายข่าว ปาล์มน้ำมัน ปีที่ 3 ฉบับที่ 4 เดือน ธันวาคม 2545 – กุมภาพันธ์ 2546
 2. สิ่งประดิษฐ์ “หัวเผาน้ำมันพืชใช้แล้วสำหรับครัวเรือน” จารุวัตร เจริญสุข และ บุญส่ง เพ็ชรน้อย, อยู่ระหว่างการยื่นขออนุสิทธิบัตร และได้เผยแพร่ออกอากาศในรายการ “รอบเรื่องเมืองไทย” ทางโทรทัศน์ ช่อง 11 วันที่ 10 กันยายน 2548 และตีพิมพ์ ในวารสาร Popular Mechanics ฉบับประจำเดือน กันยายน 2548

การยื่นขอจดสิทธิบัตร ระดับชาติ

(ง) การจดสิทธิบัตร ระดับชาติ

1. "แผ่นเชื่อมต่อทางไฟฟ้า" ตัวแทน นายเกรียงศักดิ์ ก้อนทอง นายชาญชัย นีรพัฒน์กุล นางสาวอรุณศรี ศรีธนะอิทธิพล ผู้ประดิษฐ์/ออกแบบ นางสาวสุมิตรา จรัสโรจน์กุล **นายจรรุวัตร เจริญสุข** นางสาววรรณชล วัฒนะ นายสมประสงค์ ศรีชัย Design of Interconnector for SOFC, Application form No. 0602003205, Thailand Patent office เลขที่ประกาศ 88908 เลขที่สิทธิบัตร 29021 วันที่ 26/10/2553
2. "แผ่นเชื่อมต่อทางไฟฟ้า" ตัวแทน นายเกรียงศักดิ์ ก้อนทอง นายชาญชัย นีรพัฒน์กุล นางสาวอรุณศรี ศรีธนะอิทธิพล ผู้ประดิษฐ์/ออกแบบ นางสาวสุมิตรา จรัสโรจน์กุล **นายจรรุวัตร เจริญสุข** นางสาววรรณชล วัฒนะ นายสมประสงค์ศรีชัย Design of Interconnector for SOFC, Application form No. 0602003206, Thailand Patent office เลขที่ประกาศ 88909 เลขที่สิทธิบัตร 29020 วันที่ 26/10/2553
3. "แผ่นเชื่อมต่อทางไฟฟ้า" ตัวแทน นายเกรียงศักดิ์ ก้อนทอง นายชาญชัย นีรพัฒน์กุล นางสาวอรุณศรี ศรีธนะอิทธิพล ผู้ประดิษฐ์/ออกแบบ นางสาวสุมิตรา จรัสโรจน์กุล **นายจรรุวัตร เจริญสุข** นางสาววรรณชล วัฒนะ นายสมประสงค์ศรีชัย Design of Interconnector for SOFC, Application form No. 0602003207, Thailand Patent office เลขที่ประกาศ 88910 เลขที่สิทธิบัตร 29019 วันที่ 26/10/2553
4. "ท่อปฏิรูปเชื้อเพลิงสำหรับปฏิรูปไฮโดรเจนจากเชื้อเพลิงแก๊สไฮโดรคาร์บอน" ตัวแทน นางสาวอรุณศรี ศรีธนะอิทธิพล นายชาญชัย นีรพัฒน์กุล นางสาวอรุณก พรณรรักษ์ ผู้ประดิษฐ์/ออกแบบ นางสาวสุมิตรา จรัสโรจน์กุล **นายจรรุวัตร เจริญสุข** นายมานพ มาสมทบ นายปฏิวัติ อ่อนพุธา นายชาติศักดิ์ เชษฐาพงษ์พันธ์ และนายวิทยา วงษ์กลาง Application form No. 1001001527 วันที่ 30/09/2553, Thailand Patent office เลขที่ประกาศ 113065 วันที่ 20/03/2555
5. "ชุดควบคุมแรงเชิงกลแบบแรงกระจายด้วยความสัมพันธ์ของแรงตามแนวแกน X-Y สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น" นายนิธินัย ปัญญาบุญศุภกุล นายวิทยา วงษ์กลาง **นายจรรุวัตร เจริญสุข** นางสาวสุมิตรา จรัสโรจน์กุล Application form No. 1001000930, Thailand Patent office